

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**

ISSN 3041-1491 (Print)

**МЕДИЧНА ФІЗИКА –
СУЧАСНИЙ СТАН, ПРОБЛЕМИ,
ШЛЯХИ РОЗВИТКУ
НОВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ**

Науковий збірник

Випуск 1

За матеріалами
XI Міжнародної конференції
(Київ, 25–27 вересня, 2024)



Репрезентовано наукові, методичні та практичні результати досліджень, спрямовані на вирішення актуальних питань та вдосконалення шляхів розвитку медичної фізики, підвищення рівня радіаційного захисту у сфері використання ядерної енергії, подальше впровадження новітніх технологій у медичній галузі. Проаналізовано деякі аспекти ментального здоров'я населення України під час надзвичайних ситуацій.

**ГОЛОВНИЙ
РЕДАКТОР**

АСЛАМОВА Людмила, експерт МАГАТЕ, канд. біол. наук, ст. наук. співроб., перший віце-президент громадської організації "Всеукраїнське об'єднання медичних фізиків та інженерів" (Україна)

**РЕДАКЦІЙНА
КОЛЕГІЯ**

ГЕРМАН Ольга, д-р філософії (Канада); **РЕЗНІК Алла**, д-р філософії, проф. (Канада); **ШВИДКА Діана**, д-р філософії, доц. (Сполучені Штати Америки); **ЗАБОЛОТНИЙ Михайло**, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб. (Україна); **КУЦЕВОЛ Наталія**, д-р хім. наук, ст. наук. співроб. (Україна); **МАКАРЕЦЬ Микола**, д-р фіз.-мат. наук, проф. (Україна); **МАРТИНЮК Віктор**, д-р біол. наук, проф. (Україна); **МІРОШНИЧЕНКО Сергій**, д-р техн. наук, проф. (Україна); **МЯЛОВИЦЬКА Олена**, д-р мед. наук, проф. (Україна); **НЕТРЕБА Андрій**, канд. фіз.-мат. наук, доц. (Україна); **НИКИРУЙ Любомир**, канд. фіз.-мат. наук, проф. (Україна); **ОРЕЛ Валерій**, д-р біол. наук, проф. (Україна); **ПАВЛЕНКО Тетяна**, д-р біол. наук, проф. (Україна); **ПІНЧУК Ірина**, д-р мед. наук, проф. (Україна); **РАДЧЕНКО Сергій**, канд. фіз.-мат. наук, доц. (відп. ред.) (Україна); **БРОВЧУК Сергій**, канд. фіз.-мат. наук (Україна)

**Адреса
редколегії**

Навчально-науковий центр радіаційної безпеки
вул. Васильківська, 98а, м. Київ, 03022
☎ (38044) 521 32 84
e-mail: rb@knu.ua, radbez@gmail.com
web: <https://rb.knu.ua>

Зареєстровано

Національною радою України з питань телебачення і радіомовлення
Рішення № 120 від 18.01.24
Ідентифікатор друкованого медіа: R30-02633

**Засновник
та видавець**

Київський національний університет імені Тараса Шевченка
Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет"
Свідectво про внесення до Державного реєстру
ДК № 1103 від 31.10.02

Адреса видавця

6-р Тараса Шевченка, 14, м. Київ, 01601
☎ (38044) 239 32 22, 239 31 58, 239 31 28

Автори опублікованих матеріалів несуть повну відповідальність за підбір, точність наведених фактів, цитат, статистичних даних, власних імен та інших відомостей. Редколегія залишає за собою право скорочувати та редагувати подані матеріали.

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
TARAS SHEVCHENKO NATIONAL UNIVERSITY OF KYIV

ISSN 3041-1491 (Print)

**MEDICAL PHYSICS –
THE CURRENT STATUS, PROBLEMS,
THE WAY OF DEVELOPMENT
INNOVATION TECHNOLOGIES**

Conference Proceedings

Issue 1

Proceedings
of the XIth International Conference
(Kyiv, 25–27 September, 2024)



Scientific, methodological, and practical research results are present. The results aim to solve actual problems and improve the development paths for medical physics, increase the level of radiation safety in the use of nuclear energy, and further implement innovative technologies into the medical industry. Several mental health aspects of Ukraine's population are analyzed in emergencies.

EDITOR-IN-CHIEF	ASLAMOVA Liudmyla , PhD (Biol.), Senior Research, IAEA expert, first vice president public organization "Ukrainian Association of Medical Physicists and Engineers" (Ukraine)
EDITORIAL BOARD	GERMAN Olga , PhD, International Commission on Radiological Protection (ICRP) (Canada); REZNIK Alla , PhD, Prof. (Canada); SHVYDKA Diana , PhD, Assoc. Prof., (United States of America); ZABOLOTNY Mykhaylo , PhD (Phys. & Math.), Senior Researcher (Ukraine); KUTSEVOL Nataliya , DSc (Chem.), Senior Researcher (Ukraine); MAKARETS Mykola , DSc (Phys. & Math.), Prof. (Ukraine); MARTYNYUK Victor , DSc (Biol.), Prof. (Ukraine); MIROSHNYCHENKO Sergii , DSc (Technic.), Prof. (Ukraine); MIALOVYTSKA Olena , DSc (Med.), Prof. (Ukraine); NETREBA Andrii , PhD (Phys. & Math.), Assoc. Prof. (Ukraine); NYKYRUY Lyubomyr , PhD (Phys. & Math.), Prof. (Ukraine); OREL Valerii , DSc (Biol.), Prof. (Ukraine); PAVLENKO Tetiana , DSc (Biol.), Prof. (Ukraine); PINCHUK Irina , DSc (Biol.), Prof. (Ukraine); RADCHENKO Sergiy , PhD, Assoc. Prof., (Executive Editor) (Ukraine); BROVCHUK Serhii , PhD (Phys. & Math.) (Ukraine)
Address	Training and Research Center for Radiation Safety 98a, Vasylykivska Street, Kyiv, Ukraine, 03022 ☎ (38044) 521 32 84 e-mail: rb@knu.ua , radbez@gmail.com web: https://rb.knu.ua
Registered by	the National Council of Television and Radio Broadcasting of Ukraine Decision № 120 of 18.01.24 Identifier of printed media: R30-02633
Founder and publisher	Taras Shevchenko National University of Kyiv, Publishing and Polygraphic Center "Kyiv University" Certificate of entry into the State Register ДК № 1103 dated 31.10.02
Address	PPC "Kyiv University" 14, Taras Shevchenka blvd., Kyiv, 01601 ☎ (38044) 239 32 22, 239 31 58, 239 31 28 e-mail: vpc@knu.ua

Authors of published papers are responsible for the selection, accuracy of facts, quotations, statistics, proper names and other information. The Editorial Board reserves the right to shorten and edit submitted papers.



ПЕРЕДМОВА ВІД ОРГАНІЗАТОРІВ КОНФЕРЕНЦІЇ ТА ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА ЗБІРНИКА

Шановні читачі!

Ми раді представити вам науковий збірник "Медична фізика – сучасний стан, проблеми, шляхи розвитку. Новітні технології", підготовлений за результатами XI Міжнародної конференції "Медична фізика – сучасний стан, проблеми, шляхи розвитку. Новітні технології", що успішно відбулася в м. Києві 25–27 вересня 2024 року.

Конференція стала однією з ключових подій для фахівців у галузі медичної фізики, сприяла жвавій науковій дискусії та обміну ідеями щодо найактуальніших викликів і досягнень у цій сфері. Під час різних панелей конференції учасники активно обговорювали широке коло актуальних питань, серед яких навчання та підготовка медичних фізиків, удосконалення променевої терапії й діагностики, радіаційний захист та новітні підходи до біомедичної інженерії. Учасники відзначили важливість впровадження штучного інтелекту в медичну практику, а також ділилися досвідом у дослідженні складних клінічних випадків і вдосконаленні інформаційних систем для збирання та аналізу даних. Окремий акцент зроблено на ментальному здоров'ї під час надзвичайних ситуацій та обговоренні шляхів покращення психологічної підтримки як для пацієнтів, так і для фахівців медичної галузі. Цей жвавий обмін думками і досвідом допоміг сформулювати більш цілісне бачення перспектив розвитку медичної фізики, а також окреслити практичні рекомендації для підвищення ефективності лікування та захисту населення.

Видання цього збірника здійснено завдяки плідній співпраці Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Всеукраїнського об'єднання медичних фізиків та інженерів, Навчально-наукового центру

радіаційної безпеки Київського національного університету імені Тараса Шевченка та Європейської федерації організацій медичних фізиків. Метою публікації є об'єднання зусиль представників освітніх і науково-дослідних установ, медичних закладів, інженерних компаній і громадських організацій задля підвищення професійного рівня фахівців, удосконалення кваліфікації практиків та розвитку інноваційних технологій у медичній фізиці.

Окрему увагу приділено дотриманню принципів біоетики й захисту прав пацієнтів. Принагідно зауважимо, що всі наукові дослідження та експериментальні розробки проводилися з урахуванням чинних норм і міжнародних рекомендацій у галузі біоетики та прав людини. Автори досліджень із залученням людей чи тварин надавали експертні висновки комісії з біоетики.

Збірник розрахований на широке коло фахівців: науковців, освітян, лікарів, інженерів, медичних фізиків, психологів, а також студентів і всіх, хто цікавиться питаннями радіаційної безпеки та актуальними тенденціями в медичній галузі. Представлені у статтях висновки й рекомендації будуть корисними для державних органів, законодавців і стейкхолдерів у сфері науки та охорони здоров'я.

Ми щиро вдячні членам організаційного комітету за їхній внесок: Людмилі Асламовій (Київський національний університет імені Тараса Шевченка, експерт МАГАТЕ, Україна), Миколі Кулішу (Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Україна), Аліні Велігурі (Philips, Нідерланди), Олександрі Іващенко (University Medical Center Groningen, Нідерланди), Євгену Бараннику (Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Україна), Вадиму Чумаку (Національний науковий центр "Інститут радіаційної медицини НАМН України", Україна), Валерію Пугачу (Інститут ядерних досліджень НАН України), Ірині Пінчук (Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Україна), Любомиру Никирую (Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, Україна), Сергію Бровчуку (Ізраїльська онкологічна лікарня ЛІСОД, Україна), Ярославу Чолію (Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Україна) та Людмилі Андрушко (Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Україна) за організаційну підтримку, координацію та сприяння успішному проведенню конференції і підготовці цього збірника.

Також принагідно хочемо відзначити роботу таких членів програмного комітету, як: Теему Сісконен (University of Helsinki, STUK, Фінляндія), Віктор Яковенко (University of Texas Southwestern Medical Center, США), Томас Крон (Peter MacCallum Cancer Centre, Австралія), Якоб (Джейк) ван Дайк (Western University, Канада), Алла Резнік (Lakehead University, Канада), Продромос Капланіс (Nicosia General Hospital, Кіпр), Сьорен Маттссон (Lund University,

Skåne University Hospital Malmö, Швеція), Тодорка Дімітрова (Plovdiv University "Paisii Hilendarski", Болгарія), Павел Олко (Institute of Nuclear Physics PAN, Польща), Джим Тарстон (Dorset County Hospital NHS Foundation Trust, Велика Британія), Леонід Булавін (Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Україна), Олександр Чалий (Національний медичний університет імені О. О. Богомольця, Україна) та Любов Шмиглюк (Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Україна), які брали активну участь в організації та проведенні конференції.

Сподіваємося, що матеріали збірника стануть у пригоді всім, хто прагне долучитися до подальшого прогресу медичної фізики, сприятимуть розвитку наукових контактів і надихатимуть на нові ідеї та відкриття.

Головний редактор збірника

Людмила АСЛАМОВА



PREFACE FROM THE CONFERENCE ORGANIZERS AND THE EDITOR-IN-CHIEF OF CONFERENCE PROCEEDINGS

Dear readers!

We are pleased to present the Conference Proceedings "Medical physics – the Current Status, Problems, the Way of Development. Innovation Technologies". It represents results of the XI International conference "Medical physics – the current status, problems, the way of development. Innovation technologies", which was successfully held in Kyiv on September 25–27, 2024.

The conference became one of the key events for specialists in medical physics. It contributes to a lively scientific discussion and exchange of ideas about the field's most pressing challenges and achievements. During various conference panels, participants actively discussed a wide range of topical issues, including the education and training of medical physicists, the improvement of radiotherapy and diagnostics, radiation protection and the latest approaches to biomedical engineering. Participants noted the importance of introducing artificial intelligence into medical practice, and also shared their experience in studying complex clinical cases and improving information systems for data collection and analysis. A special emphasis was placed on mental health during emergencies. Participants discussed ways to improve psychological support for both patients and medical professionals. This fruitful exchange of views and experiences helps to form a more holistic vision of the prospects for the development of medical physics and outlines practical recommendations to increase the effectiveness of treatment and public protection.

The Conference Proceedings publication is possible thanks to the fruitful collaboration between Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukrainian Association of Medical Physicists and Engineers, Training and Research Center for Radiation Safety Taras Shevchenko National University of Kyiv, and European Federation of Organizations for Medical Physics. The purpose is to unite the efforts of representatives from educational and research institutions, medical institutions,

engineering companies, and public organizations to increase the professional level of specialists, improve the qualifications of practitioners, and develop innovative technologies in medical physics.

Particular attention is paid to compliance with the principles of bioethics and patients' rights protection. It should be noted that all scientific research and experimental developments were carried out taking into account current norms and international recommendations in the field of bioethics and human rights. The authors of studies involving humans or animals provided expert opinions of bioethics commissions.

The Conference Proceedings is intended for a wide range of specialists: scientists, educators, doctors, engineers, medical physicists, psychologists, as well as students and everyone interested in radiation safety issues and current trends in the medical field. The conclusions and recommendations presented in the articles are useful for government agencies, legislators and stakeholders in science and health fields.

We are sincerely grateful to organizing committee members for their contribution: Liudmyla Aslamova (Taras Shevchenko National University of Kyiv, IAEA expert, Ukraine), Mykola Kulish (Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine), Alina Veligura (Philips, Netherlands), Oleksandra Ivashchenko (University Medical Center Groningen, Netherlands), Evgen Barannik (V. N. Karazin Kharkiv National University, Ukraine), Vadim Chumak (National Research Center for Radiation Medicine National Academy of Medical Sciences of Ukraine, Ukraine), Valery Pugatch (Institute for Nuclear Research National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine), Irina Pinchuk (Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine), Lyubomyr Nykyruy (Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Ukraine), Serhii Brovchuk (Israeli Oncological Hospital LISOD, Ukraine), Yaroslav Cholii (Web Developer, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine), Liudmyla Andrushko (Secretary, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine) for support in organization, coordination, and assistance in making the conference successful and, especially, in preparing the Conference Proceedings.

We would like to take this opportunity to acknowledge the program committee members who actively participated in the organization and holding of the conference: in particular, Teemu Siiskonen (University of Helsinki, STUK, Finland), Viktor Iakovenko (University of Texas Southwestern Medical Center, United States of America), Tomas Kron (Peter MacCallum Cancer Centre, Australia), Jacob (Jake) Van Dyk (Western University, Canada), Alla Reznik (Lakehead University, Canada), Prodromos Kaplanis (Nicosia General Hospital, Cyprus), Sören Mattsson (Lund University, Skåne University Hospital Malmö, Sweden), Todorka Dimitrova (Plovdiv University "Paisii Hilendarski", Bulgaria), Pawel Olko (Institute of Nuclear Physics PAN, Poland), Jim Thurston (Lead

Preface

Healthcare Scientist to the Trust Head of Medical Physics & Healthcare Technology, Dorset County Hospital NHS Foundation Trust, United Kingdom), Leonid Bulavin (Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine), Alexander Chalyi – Bogomolets National Medical University (Ukraine), Liubov Shmyhliuk (Technical Secretary, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine).

We hope that the Conference Proceedings will be useful to everyone who seeks to contribute to the further progress of medical physics, contribute to the development of scientific contacts, and inspire new ideas and discoveries.

Editor-in-Chief

Liudmyla ASLAMOVA

ЗМІСТ

Передмова	5
-----------------	---

НАВЧАННЯ ТА ПІДГОТОВКА МЕДИЧНИХ ФІЗИКІВ

ВАН ДАЙК Якоб Наставництво для медичних фізиків: коли та як?	19
КАПЛАНІС Продромос Як підготуватися до використання штучного інтелекту в медичній фізиці	25
ДІМІТРОВА Тодорка, БОРИСОВА Рада Впровадження сучасної підготовки з променевої терапії для студентів-магістрів із медичної фізики: методологічний підхід	33
ВАЛЕНТАЙН Джек, ХЕДМАН Крістель, ЛАГЕРГРЕН ЛІНДБЕРГ Маріта, ЛІНДБЕРГ Карін, СТЕНКЕ Лейф Медична підготовленість та лікування пацієнтів у Швеції	43
АСЛАМОВА Людмила, АНДРУШКО Людмила, ШМИГЛЮК Любов Прогалини в підготовці та працевлаштуванні медичних фізиків в Україні	51
НИКИРУЙ Любомир, ХОМА Дарія, ФЕДОСОВ Сергій, ЛАБУЗ Мірослав, КУЦАБ Кшиштоф Медична фізика в університетських програмах: виклики для України	60
ПОДПАЛОВА Ольга, РЕШЕТНИК Євдокія, ПРИБИТЬКО Ірина, МНЕВЕЦЬ Руслан, КОВАЛЬЧУК Олександр Наукові студентські гуртки як ефективний компонент сучасної медичної освіти	68
НОСИК Ольга Алгоритм нострифікації медичних фізиків відповідно до вимог Євросоюзу	74

РАДІАЦІЙНИЙ ЗАХИСТ

МАТТССОН Сьорен Сучасний розвиток медичної радіаційної фізики та радіаційного захисту	80
ГРІЩЕНЕ Біруте, КРИНКЕ Леонід, БАРЕЙКЕ Мілда, ЙРЕІС Антонію, СКОВОРОДКО Кірілл До перевіреної практики управління дозами опромінення пацієнтів у педіатричній радіології	89
СКОВОРОДКО Кірілл, ЙРЕІС Антонію, АНДРІУЛЕВІЧУТЕ Інґа, КРИНКЕ Леонід, ГРІЩЕНЕ Біруте Подальше дослідження еквівалентності свинцю та цілісності засобів індивідуального захисту, що використовуються в клінічній практиці	96
ФЕДОРЕНКО Ганна, РОМАНЕНКО Сергій, КОЗАК Оксана, РОМАНЕНКО Людмила, РОДАК Оксана Значення брахітерапії в лікуванні поширеного раку поперечно-ободової кишки (клінічний випадок)	105

ПАВЛЕНКО Тетяна, ФРИЗЮК Мирослава Державний план заходів щодо радону – методичне забезпечення його реалізації.....	110
СКАЛЕЦЬКИЙ Юрій, ЯВОРОВСЬКИЙ Олександр, БРУХНО Роман, РИГАН Михайло, КРАВЧЕНКО Сергій Співпраця вітчизняної науки і медичної практики у формуванні культури безпеки в медичній галузі	118
ОСЬМУХА Антон, КУЛІКОВА Фаїна, ЦАРЕНКО Лариса, КАЛУШКО Лариса С-дуги – користь, шкода, особливості використання	126
БСЛИХ Дмитро, ЛИТВИНСЬКА Тетяна, ПОЛУДНЕНКО Віталій, СІТНИКОВА Ольга Визначення товщини десятикратного ослаблення випромінювання витоку від медичних лінійних прискорювачів з енергією 6 МеВ.....	131
БРОВЧУК Сергій, ДІДІК Аліна, САФРОНОВА Олена, ШЕПІЛЬ Зоя Введення в експлуатацію медичних лінійних прискорювачів із підігнаними параметрами (MATCHED LINACS).....	139
МАМЧУР Віталій Переваги застосування методики опромінення на глибокій затримці дихання (DIBH) під час стереотактичної радіотерапії (SBRT)	147
ПЕРЕПЕКА Євген, СИЧИК Марина, КРАВЧУК Борис Ефективне зменшення радіаційного опромінення під час катетерних процедур за допомогою оптимізації навігаційної системи електро-анатомічного картування та протоколу виконання операції ізоляції легеневих вен.....	153
КОЗАК Оксана, ФЕДОРЕНКО Ганна, РОМАНЕНКО Сергій, РОМАНЕНКО Людмила, РОДАК Оксана Використання голок для опромінення гінекологічних пухлин.....	163
ВАЩИШИН Володимир Застосування SRT на лінійних прискорювачах без 6D-стола.....	169
МІРОШНИЧЕНКО Сергій, МІРОШНИЧЕНКО Олександра, ХОБТА Юрій Розрахунок ефективності захисної kabіни для ветеринарної рентгенівської системи	177

БІОМЕДИЧНА ІНЖЕНЕРІЯ

БАРАННИК Євген, ГРИЦЕНКО Михайло Спектри сигналів ультразвукового доплерівського відгуку під час використанні технології компаундингу плоских хвиль.....	184
МАРТИНЮК Віктор, МЕЛЬНИК Марія, ЦЕЙСЛЕР Юлія Вплив електромагнітного поля частотою 8 та 50 Гц на скорочення гладеньком'язових смужок шлунка щурів	190
ПРИЙМАК Тарас, ГАСЮК Іван, ЧЕРВІНКО Дмитро Трансформація частотної дисперсії електричних параметрів тканин печінки залежно від температури зберігання	196
ЗАБОЛЮТНИЙ Михайло, АСЛАМОВА Людмила, БАРАБАШ Максим, СОЛЯНИК Галина, ЧЕРНЯК Віктор Модифікація оптичних спектрів та цитостатичної активності доксорубіцину іонізуючим опромінюванням	205

РИЖКОВА Анастасія, ГАПОНОВ Антон, ПАВЛЕНКО Олена, ДМИТРЕНКО Оксана, МОМОТ Андрій	
Комп'ютерне моделювання комплексоутворення бічачого сироваткового альбуміну з барвником тіохромом.....	214
МАКСИМУК Владислав, ГАПОНОВ Антон, ПАВЛЕНКО Олена, ДМИТРЕНКО Оксана, КУЛІШ Микола	
Оптичні властивості плівок вуглецевих наноструктур з барвниками-фотосенсибілізаторами для фотодинамічної терапії	220
ШАЙКО-ШАЙКОВСЬКИЙ Олександр, ДУДКО Олексій, КРИВОНОСОВ Валерій, ЯКИМ'ЮК Дмитро	
Біомеханічні аспекти накісткового остеосинтезу діафізарних переломів.....	226
ГУСЛІСТИЙ Артур, ХОРОЛЬСЬКИЙ Олексій	
Математична модель залежності дзета-потенціалу сироваткового альбуміну людини від рН фізіологічного розчину	234
СЛЮСАРЕНКО Денис, НЕТРЕБА Андрій	
Адаптивне знешумлення МРТ-зображень мозку з використанням нейронних мереж та розбиття на діапазони	240
РАМАЗАНОВ Дмитро, АНОХІН Ігор, ПУГАЧ Валерій, КОВАЛЬЧУК Олексій	
Розробка та оптимізація вольфрамових матричних коліматорів для просторово фракціонованої радіаційної терапії	248
ХОРОЛЬСЬКИЙ Олексій, ФУДУЛЕЙ Наталія, СТОЛЯРИК Оксана, ЧЖАН Вей	
Вплив динамічного фазового переходу у воді на електрофізичні властивості водних розчинів альбуміну	255

ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В МЕДИЦИНІ

ВЕЛІГУРА Аліна	
Права інтелектуальної власності як інструмент захисту інноваційної діяльності.....	261
ВІРИЧ Павло, КУЦЕВОЛ Наталія, ЄЩЕНКО Олег, СМОКАЛ Віталій	
Мультикомпонентна наносистема для фотодинамічної протипухлинної терапії	267
ОРЕЛ Валерій Б., ДЄДКОВ Анатолій, ОРЕЛ Валерій Е., ДАСЮКЕВИЧ Ольга, РИХАЛЬСЬКИЙ Олександр	
Дослідження впливу індукційної помірної гіпертермії на гетерогенність МРТ-зображень саркоми-45	275
НАДТОКА Оксана, ВІРИЧ Павло, КУЦЕВОЛ Наталія	
Антибактеріальні властивості гідрогелів на основі поліакриламідів та полігексаметиленгуанідингідрохлориду	281
ЧЕРНЯК Віктор, БУЦЬКА Лідія, МЯЛОВИЦЬКА Олена, БУЛЬДА Володимир, РИЖАК Валентин	
Застосування персоналізованого підходу до формування протоколу реабілітації військових із ПТСР та ураженнями головного мозку.....	287
ЧАЛИЙ Олександр, ГРИЦЕНКО Наталія, КРИШТОПА Альбіна, МАРГОЛИЧ Ірина, ХРАПІЙЧУК Галина	
Закон збереження маси в методі позитронної емісійної томографії.....	295

ГОРБАЧЕНКО Олександр, ПЛЮЙКО Володимир Аналіз неоднозначностей визначення перерізів утворення радіоізотопів ^{99m}Tc , ^{177}Lu	304
ЧЕРНЯК Віктор, КАРПЕНКО Костянтин Розробка пристрою виявлення нерентгеноконтрастних уламків у поранених після вогнепальних поранень	313
РЯБКО Іван, ТЕРЕЦЬ Андрій, РЄБЕНКОВ Станіслав, РАДЧЕНКО Сергій Прогнозування кісткового віку дітей за допомогою глибокого навчання на основі рентгенівських знімків кистей рук	321
ЛАПТАН Костянтин, НЕМЧЕНКО Костянтин, ЛІСТРОВА Дар'я Модифіковані алгоритми лінійного сканування в комп'ютерній томографії	329
ОСМАН Сундус, ВЕНСКАУСКАЙТЕ Реда, ЧЕРАПАЙТЕ-ТРУШІНСКІЄНЕ Реда, ЛАУРІКАЙТІЄНЕ Юрґіта Оцінювання ризику вторинного раку за допомогою протоколів візуалізації тазової конічної променевої комп'ютерної томографії.....	335

ВЕБІНАР "МЕНТАЛЬНЕ ЗДОРОВ'Я ПРИ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ В УКРАЇНІ: ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ"

ЧУМАК Станіслав, ПЕРЧУК Ірина Порівняльна характеристика суїцидальної поведінки ветеранів Операції Об'єднаних сил на Сході України і ліквідаторів наслідків аварії на Чорнобильській атомній електростанції.....	344
СТЕПАНОВА Наталія Ментальне здоров'я студентів: потреба у підтримці в умовах війни	354
ПЕРЧУК Ірина, КУЦ Костянтин, КРЕЙНІС Георгій, ЗДАНЕВИЧ Наталія, ЧУМАК Станіслав Досвід вивчення нейропсихіатричних змін у осіб, що постраждали внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС.....	362
ВІРЧЕНКО Володимир Ментальне здоров'я та продуктивність академічної діяльності українських студентів у період війни	370
КРЕЙНІС Георгій Психологічні та нейрофізіологічні зміни у військовослужбовців Національної гвардії України, що охороняли Державне спеціалізоване підприємство "Чорнобильська АЕС", після звільнення з полону	379
ПІМЕНОВА Наталія Курс управління стресом "Самодопомога Плюс" в університетах	388
КУЦ Костянтин, ПЕРЧУК Ірина, КРЕЙНІС Георгій, АНТИПЧУК Катерина, ВАСИЛЕНКО Злата Пострадіаційний нейрокогнітивний дефіцит у осіб, постраждалих унаслідок аварії на Чорнобильській атомній електростанції.....	394
ПИЛЯГІНА Галина, ПУХОВСЬКИЙ Богдан Саморуйнівна поведінка при депресивних розладах у підлітковому віці.....	402

CONTENTS

Preface	8
----------------------	---

EDUCATION AND TRAINING OF MEDICAL PHYSICISTS

VAN DYK Jacob Mentoring for medical physicists: when and how?	19
KAPLANIS Prodromos How to prepare for AI in medical physics.....	25
DIMITROVA Todorka, BORISOVA Rada Bringing up-to-date radiotherapy training for MSc students: a methodological approach.....	33
VALENTIN Jack, HEDMAN Christel, LAGERGREN LINDBERG Marita, LINDBERG Karin, STENKE Leif Medical preparedness and patient management in Sweden	43
ASLAMOVA Liudmyla, ANDRUSHKO Liudmyla, SHMYHLIUK Liubov Medical physicist education and employment gaps in Ukraine	51
NYKYRUY Lyubomyr, KHOMA Daria, FEDOSOV Sergiy, LABUZ Miroslaw, KUCAB Krzysztof Medical physics education: challenges for Ukraine.....	60
PODPALOVA Olga, RESHETNIK Evdokia, PRIBYTKO Iryna, MNEVETS Ruslan, KOVALCHUK Oleksandr Scientific student groups as an effective component of modern medical education	68
NOSYK Olga Nostrification algorithm of medical physicist in accordance with EC requirements	74

RADIATION PROTECTION

MATTSSON Sören Current developments in medical radiation physics and radiation protection.....	80
GRICIENĖ Birutė, KRYNKE Leonid, BAREIKĖ Milda, JREIJE Antonio, SKOVORODKO Kirill Towards good practice in patient dose management in paediatricradiology	89
SKOVORODKO Kirill, JREIJE Antonio, ANDRIULEVIČIŪTĖ Inga, KRYNKE Leonid, GRICIENĖ Birutė A follow-up study on the lead equivalence and integrity of personal protective equipment used in clinical practice	96
FEDORENKO Hanna, ROMANENKO Serhiy, KOZAK Oksana, ROMANENKO Lyidmila, RODAK Oksana Significance of brachytherapy treatment in advanced cancer of transverse colon (case report)	105
PAVLENKO Tetiana, FRYZIUK Myroslava State action plan for radon – methodological support for its implementation	110
SKALETSKYI Yuriy, YAVOROVSKYI Oleksandr, BRUKHNO Roman, RYGAN Mykhailo, Sergiy KRAVCHENKO Cooperation of domestic science and medical practice in forming a culture of safety in the medical industry.....	118

OSMUKHA Anton, KULIKOVA Faina, TSARENKO Larisa, KALIUSHKO Larisa Benefit, damage and features of use of C-arcs.....	126
BIELYKH Dmytro, LYTVYNSKA Tetiana, POLUDNENKO Vitalii, SITNIKOVA Olha Determination of the tenth value layer of leakage radiation attenuation from medical linear accelerators with the energy of 6 MeV.....	131
BROVCHUK Serhii, DIDIK Alina, SAFRONOVA Olena, SHEPIL Zoia Commissioning of medical linear accelerators with matched parameters (MATCHED LINACS)	139
MAMCHUR Vitalii Advantages of using deep inspiration breath hold (DIBH) radiation methods during stereotactic radiotherapy (SBRT)	147
PEREPEKA Eugene, SYCHYK Maryna, KRAVCHUK Borys Effective reduction of radiation exposure during catheter procedures through optimization of the electroanatomical mapping navigation system and pulmonary vein isolation procedure protocol.....	153
KOZAK Oksana, FEDORENKO Hanna, ROMANENKO Serhiy, ROMANENKO Lyidmila, RODAK Oksana Use of needles in irradiation of gynecological tumors	163
VASHCHYSHYN Volodymyr Application of SRT on linear accelerators without a 6D table	169
MIROSHNYCHENKO Sergii, MIROSHNYCHENKO Oleksandra, KHOBTA Yurii Calculation of effectiveness of the veterinary X-ray systems protective cabin.....	177

BIOMEDICAL ENGINEERING

BARANNIK Evgen, HRYTSENKO Mykhailo Spectra of ultrasound Doppler response using plane-wavecompounding technique	184
MARTYNIUK Viktor, MELNYK Maria, TSEYSLER Yuliya Effect of electromagnetic field with frequency 8 and 50 Hz on the contraction of smooth muscle strips of the stomach of rats.....	190
PRYIMAK Taras, GASYUK Ivan, CHERVINKO Dmytro Transformation of frequency dispersion of electrical parameters of liver tissues depending on storage temperature	196
ZABOLOTNYY Mykhaylo, ASLAMOVA Lyudmila, BARABASH Maxim, SOLYANIK Galyna, CHERNYAK Viktor Modification of optical spectra and cytostatic activity of doxorubicin by ionizing radiation.....	205
RYZHKOVA Anastasiya, GAPONOV Anton, PAVLENKO Olena, DMYTRENKO Oksana, MOMOT Andriy Computer simulation of complexation of bovine serum albumin with thiochrome dye	214
MAXYMUK Vladyslav, GAPONOV Anton, PAVLENKO Olena, DMYTRENKO Oksana, KULISH Mykola Optical properties of films of carbon nanostructures with photosensitizing dyes for photodynamic therapy	220

SHAIKO-SHAIKOVSKIY Alexander, DUDKO Oleksii, KRYVONOSOV Valerii, YAKIMYUK Dmitro	
Biomechanical aspects of bone plate osteosynthesis for diaphyseal fractures	226
GUSLISTY Artur, KHOROLSKYI Oleksii	
Mathematical model of the dependence of the zeta potential of human serum albumin on the pH of the saline	234
SLIUSARENKO Denys, NETREBA Andrii	
Brain MRI images adaptive denoising by applying neural networks and range-based partitioning	240
RAMAZANOV Dmytro, ANOKHIN Igor, PUGATCH Valerii, KOVALCHUK Oleksii	
Development and optimization of tungsten matrix collimators for spatially fractionated radiation therapy	248
KHOROLSKYI Oleksii, FUDULEI Natalia, STOLIARYK Oksana, ZHANG Wei	
The effect of a dynamic phase transition in water on the electrophysical properties of aqueous albumin solutions	255

INNOVATION TECHNOLOGIES IN MEDICINE

VELIGURA Alina	
Intellectual property rights as a tool in securing innovation	261
VIRYCH Pavlo, KUTSEVOL Nataliya, YESHCENKO Oleg, SMOKAL Vitalii	
Multicomponent nanosystem for photodynamic anti-tumor therapy	267
OREL Valerii B., DIEDKOV Anatolii, OREL Valerii E., DASYUKEVICH Olga, RYKHALSKYI Oleksandr	
Examination of the effect of inductive moderate hyperthermia on sarcoma-45 heterogeneity using magnetic resonance imaging	275
NADTOKA Oksana, VIRYCH Pavlo, KUTSEVOL Nataliya	
Antibacterial properties of hydrogels based on polyacrylamide and polyhexamethyleneguanidine hydrochloride	281
CHERNYAK Viktor, BUTSKA Lidia, MYALOVYTSKA Olena, BULDA Volodymyr, RYZHAK Valentin	
Application of a personalized approach to the formation of the rehabilitation protocol for military people with PTSD and brain injuries	287
CHALYI Alexander, GRYTSENKO Natalia, KRYSHTOPA Albina, MARGOLYCH Iryna, KHRAPICHUK Halyna	
The law of mass conservation in the method of positron emission tomography	295
GORBACHENKO Oleksandr, PLUJKO Volodymyr	
Analysis of ambiguities in the determination of cross sections of the radioisotopes ^{99m}Tc , ^{177}Lu formation	304
CHERNYAK Viktor, KARPENKO Kostiantyn	
Development of a device for the detection of Non-X-ray contrast fragments in the wounded after burnt injuries	313
RIABKO Ivan, TERETS Andrii, RIEBIENKOV Stanislav, RADCHENKO Sergiy	
Assessing a child's bone age using deep learning on hand X-ray images	321
LAPITAN Kostyantyn, NEMCHENKO Kostyantyn, LISTROVA Daria	
Modified linear scanning algorithms in computed tomography	329

OSMAN Sundus, VENSKAUSKAITĖ Reda, ČERAPAITĖ-TRUŠINSKIENE Reda, LAURIKAITIENE Jurgita Secondary cancer risk assessment of pelvic cone beam computed tomography imaging protocols	335
--	-----

WEBINAR
"MENTAL HEALTH
DURING EMERGENCY SITUATIONS IN UKRAINE:
RESEARCH AND RECOMMENDATIONS"

CHUMAK Stanislav, PERCHUK Iryna Comparative characteristics of suicidal behavior in veterans of the Joint forces operation in Eastern Ukraine and liquidators of the Chernobyl nuclear power plant accident	344
STEPANOVA Nataliia Mental health of students: need for support in wartime	354
PERCHUK Iryna, KUTS Kostiantyn, KREINIS Heorhii, ZDANEVYCH Nataliia, CHUMAK Stanislav Experience in the study of neuropsychiatric changes in people affected by the Chernobyl accident	362
VIRCHENKO Volodymyr Mental health and productivity of Ukrainian students in the time of war	370
KREINIS Heorhii Psychological and neurophysiological changes in the servicemen of the National guard of Ukraine who guarded the State specialized enterprise Chernobyl SSNP after release from captivity	379
PIMENOVA Nataliia Stress management course "Self-Help Plus" in universities	388
KUTS Kostiantyn, PERCHUK Iryna, KREINIS Heorhii, ANTYPCHUK Kateryna, VASYLENKO Zlata Post-radiation neurocognitive deficit in persons affected by the Chornobyl accident	394
PYLIAGINA Galyna, PUKHOVSKYI Bohdan Self-destructive behavior in depressive disorders in adolescence	402

НАВЧАННЯ ТА ПІДГОТОВКА МЕДИЧНИХ ФІЗИКІВ EDUCATION AND TRAINING OF MEDICAL PHYSICISTS

UDC 61:53:005.963.2+378:004.77

DOI: <https://doi.org/10.17721/3041-1491/2024.11-01>

Jacob VAN DYK, Emeritus Prof.
ORCID ID: 0000-0003-0304-2647

e-mail: vandyk@uwo.ca

Western University, London, Ontario, Canada

MENTORING FOR MEDICAL PHYSICISTS: WHEN AND HOW?

Education programs for medical physicists can be limited by local teaching resources and available technologies. Furthermore, modern imaging and therapy technologies continue to evolve at a rapid rate and require continuous learning support for their safe and effective implementation in the clinic. Mentorship provides an important resource in support of filling the educational gaps and the knowledge updates required for the development of new techniques and the implementation of new technologies. A structured mentorship process can be a useful resource at any point during a medical physicist's career, although the specific purpose of the mentorship will likely vary depending on when in one's career this occurs. This review provides a description of the various stages of a structured mentorship program along with some guidance on how to implement a sustainable and successful mentorship activity. Seven mentorship stages are described including 'defining the purpose of the mentorship', 'finding mentor / mentee partners', 'setting the scene', 'engagement', 'evaluation', 'redefinition', and 'separation'. Some etiquette guidelines are proposed including some suggested dos and don'ts. In some regions, there may be a dearth of nearby appropriately experienced mentors. Mentoring virtually using internet technologies may provide a good alternative. The results of an on-line global survey related to virtual mentoring are summarized. In conclusion, structured mentorships may provide a very useful resource for medical physicists at any stage of their careers. Understanding how best to navigate such mentorship programs will maximize their benefits.

Keywords: *mentorship, medical physics, stages in mentoring, etiquette in mentoring, virtual mentoring, dos and don'ts in mentoring.*

Introduction

The dictionary definition of "mentor" as a noun is "a trusted counselor or guide" and as a verb "to serve as a mentor for". (Merriam-Webster, 2024). Mentoring can be a means of professional development through two people working in partnership in which one person has more experience or knowledge in a specific area (the mentor) who helps or guides a less experienced individual (the mentee) in that area. Mentoring can occur at any stage of an individual's career, be it at the graduate student level, during a residency which involves 'hands on, on the job' training, or during one's career advancement, whether in the clinic as one advances from a junior physicist, to a senior physicist, or the head of a department, or at the university as one advances from assistant professor to full professor, or department chair. The

© Van Dyk Jacob, 2024

mentor-mentee relationship depends on the knowledge and experience of the individuals and not necessarily on age or position. Mentorship can be structured as in formalized mentoring programs, or it can be unstructured simply by being influenced by one's supervisor, superior, boss, or colleague. Mentoring can have two specific functions: (1) as in career and professional development, and (2) as in psychosocial development where the mentor serves as a role model and provides a support system for the mentee (American Psychological Association, 2024a). In some situations both functions can apply. The former addresses professional and career related issues and the latter addresses more broadly-based life-related issues, as, for example, in work-life balance.

Mentoring stages. The stages of mentoring depend on the type of mentoring that is being considered. For informal mentoring, there really is no structured process. By way of example, I consider my graduate student supervisor, John C.F. MacDonald, as well as my first bosses, Harold E. Johns and John R. (Jack) Cunningham, of the book *The Physics of Radiology* fame (Johns, & Cunningham, 1983), to be mentors simply by being role models and examples in terms of guidance, leadership, and decision making. Informal mentoring evolves naturally without any defined or formal structure. Such informal mentoring has no formally defined roles for the individuals involved; it just evolves organically, primarily from the mentee's perspective. The mentors may not even recognize that they are providing a mentorship role. A limitation of informal mentorship is that not everyone has such mentors in their circles. Thus, it is very happenstance with this working for some but not for others. Seeing that informal mentorship is stochastic, it is useful for most individuals to be involved in more formalized mentorship programs (Afya Bora Fellowship ..., 2018; Alberta Mentorship Program, 2020).

Various authors have described various stages in a mentorship process. This is my summary of these stages based on what I have seen described by others and my personal experience. Clearly, there will be a variation on these stages, dependent on the specific circumstances. This also varies with the nature of the organizational structure behind the mentorship program. For example, is it self-organized by the mentee or is there an organization (e.g., a university, or a medical physics society) that is providing a structured mentorship program in which help is provided in matching mentors and mentees and guidance is provided for the entire process? I summarize these stages as follows: (1) Defining the purpose of the mentorship; (2) Finding mentor/mentee partners; (3) Setting the scene; (4) Engagement; (5) Evaluation; (6) Redefinition; (7) Separation.

1. Purpose of Mentorship. For both the mentee and the mentor it is important to understand at the outset what the purpose of the mentorship is. Examples could include: (a) to improve the employee's skill level; for medical physicists this could include anything from enhancing treatment planning skills to advancing radiation measurement skills, or more generally, enhancing all practical skills relevant for a practicing clinical physicist; (b) to developing leadership capability; (c) to act as a role model for addressing life skills, e.g., work-life balance, or career development considerations; and (d) to build self-confidence in, for example, public or local

presentations. At this stage, it also helpful to define some endpoints that describe the success of the mentoring activity.

2. Finding Mentor/Mentee Partnerships. The mentor/mentee matching process depends on the organization behind the mentorship program. For informal mentoring, this process can evolve through professional or social interactions. Potential mentees can search for experienced or successful people whom they admire as role models. Formal mentoring programs, likely will use some form of questionnaire or survey to guide the matching, using demographic, knowledge, and experience variables. For example, if radiation therapy equipment commissioning and quality assurance is a major focus of the mentoring, then one might want to use one component of the matching process as the nature of the equipment in both the mentor's and mentee's departments. The more aligned the departments are from a technology perspective, they more detailed the discussion can be between mentor and mentee.

3. Setting the Scene. The first step by the mentor and mentee is to jointly develop a written mentorship agreement, which clearly outlines (University of Iowa, 2021): (1) the purpose and expectations, (2) frequency, length, and format of meetings, (3) review process, (4) length of time of mentorship commitment, and (5) rationale for termination.

4. Engagement. This is the mentoring stage of learning and development to accomplish the goals established at the outset of the process. The mentor teaches the mentee lessons gained from the mentor's experience. In turn, the mentee might teach the mentor lessons related to new technologies, methodologies, or emerging issues in medical physics.

5. Evaluation. As part of the development of the mentorship process, clear objectives along with definable and measurable endpoints provide guidance as to the success of the mentorship program. Thus, the evaluation should assess whether the mentorship is meeting its objectives. Successes and limitations should be discussed at predefined intervals and adjustments should be made as appropriate.

6. Redefinition. This is directly related to the evaluation. At this stage, the review addresses the successes and weaknesses of the mentoring process, and whether the process should continue as is, or whether the purpose should be redefined, or whether the engagement process should be altered. In other words, this might be a renegotiation of the original agreement to establish a modified mentorship agreement, or to bring the mentorship to a close. Frank, open and professional discussion will decide how to proceed with or finish the mentorship.

7. Separation. The separation stage occurs when the mentorship ends, possibly because the mentorship has accomplished its goals, or because the individuals no longer want to continue with the process. Note that ending the relationship is not a sign of failure; it could simply mean that the original purpose of the mentorship has been fulfilled.

Etiquette of mentoring. Note that mentors and mentees will have had different backgrounds and experiences. Because of the variations in mentoring processes, some broad suggestions can be considered as guidelines to make the relationship feel comfortable and valued. Table 1 gives some broad dos *and* don'ts to consider in this context.

Table 1

**Example mentor and mentee dos and don'ts as etiquette guidelines
(adapted from (American Psychological Association, 2024a,b;
National Society of Professional Engineers, 2024))**

Mentor Dos	Mentor Don'ts
Do provide mentorship only in your areas of expertise. Suggest other mentors as resources outside your expertise or when the attempted mentoring relationship is not working.	Don't take on more mentees than is realistically manageable.
Do indicate openness to being a mentor. Be accessible to the mentee.	Don't treat mentees as free labor.
Do maintain clear, distinct boundaries with the mentee. Set clear expectations.	Don't make personal requests of the mentee.
Do treat the mentee professionally and in an ethical fashion. Be thoughtful and sensitive about the mentee's feelings and time.	Don't gossip about the mentee. Maintain total confidentiality.
Do model professional behavior.	Don't micromanage the mentee. Provide advice and counsel, but do not direct the mentee to take specific actions.
Do respect your mentee's time as much as your own.	Don't assume that your schedule always has priority.
Do be explicit about the 'norms' for your meetings and your own needs and limits (e.g., time, style of interfacing, etc.).	Don't make your mentee guess or learn by trial and error, about the ground rules for your meetings.
Do always ask if you can make a suggestion or offer feedback.	Don't automatically give advice or criticism.
Do set specific goals and expectations for the mentoring relationship. Clearly communicate what you want from the relationship. Maintain distinct boundaries and understand what the mentor expects.	Don't expect the mentor to make decisions for you. Learn to resolve problems and issues independently of the mentor.
Do be proactive. It is the mentee's responsibility to maintain contact with the mentor and schedule future interactions.	Don't take advantage of the mentor. Respect the mentor's time and help.
Do treat the mentor professionally and in an ethical fashion. Be thoughtful and sensitive about the mentor's feelings and time.	Don't gossip about the mentor.
	Don't take rejection or termination of a mentoring process personally.

Virtual mentoring. Matching mentor and mentee from the same institution is not always possible, especially in contexts where departments are small, or where available expertise is limited. In this case, virtual mentoring might provide a solution, where the mentoring takes place using information communication technologies (ICTs). Medical Physics for World Benefit (MPWB) has recently undertaken a

global survey of medical physicists to determine the preferences and needs for virtual mentoring especially in the context of resource limited environments. The survey had nearly 400 responders (68 % male, 32 % female) from 76 countries with 66 % from high-income countries and 32 % from low- and middle-income countries. Data were obtained on experience level both as mentors and mentees. Eighty-three percent were interested in participating in a mentorship program either as a mentor, mentee or both. The results of this survey provided important considerations to inform the development of a successful and sustainable virtual mentoring program for medical physicists. Nearly all respondents agreed that it is important to have clear expectations formalized at the initiation of the mentoring process. Preferences were given to meeting once every 2–4 weeks for 30–60 minutes to discuss and help solve specific problems, to address clinical questions and detailed clinical implementation procedures. A regular review process should be established as part of the mentoring agreement. Mentorship training was considered important for both mentors and mentees. MPWB will be implementing a formalized mentorship program in support of advancing medical physics especially in lower income contexts. If interested, keep an eye on the MPWB website (www.mpwb.org).

Discussion and conclusions

Mentoring can be a useful process for advancing the knowledge and experience of individual medical physicists for the safe and effective implementation of technologies and techniques for imaging and therapy. While mentoring has often been performed with little structure, this review provides relevant considerations for the implementation of a more rigorous mentorship program leading to an efficient structured mentorship activity.

Acknowledgements, sources of funding. The virtual mentoring survey project was initiated by Medical Physics for World Benefit (MPWB). The contributors to that project were Jacob van Dyk, Matt Jalink, Robert Jeraj, and John Schreiner. No funding sources were needed.

References

- Afya Bora Fellowship in Global Health Leadership. (2018). *Mentoring Handbook*. https://depts.washington.edu/afyabora/materials/Afya_Bora_Mentoring_Handbook_2018_final.pdf
- Alberta Mentorship Program. (2020). *Resource Guide*. https://eriecmentorship.sfo2.digitaloceanspaces.com/media/documents/AMP_Resource_Guide.pdf
- American Psychological Association. (2024a). *Introduction to Mentoring: A Guide for Mentors and Mentees*. <https://www.apa.org/education-career/grad/mentoring>
- American Psychological Association. (2024b). *Mentor and Mentee Dos and Don'ts*. <https://www.apa.org/education-career/grad/table-2-mentoring.pdf>
- Johns, H. E., & Cunningham, J. R. (1983). *The Physics of Radiology*. (4 Ed.). Springfield, IL, Charles C. Thomas.
- Merriam-Webster. (2024). Dictionary. <https://www.merriam-webster.com/dictionary/mentoring>
- National Society of Professional Engineers. (2024). *The Etiquette of Mentoring Do's and Don'ts*. https://www.nspe.org/sites/default/files/resources/pdfs/mentoring/Mentoring_Etiquette.pdf
- University of Iowa. (2021). *A Handbook for Mentors and Mentees*. <https://mentor.uiowa.edu/sites/mentor.uiowa.edu/files/2021-12/Mentoring%20Master%20Doc.pdf>

Отримано редакцією збірника / Received: 17.07.24

Прорецензовано / Revised: 29.07.24

Схвалено до друку / Accepted: 30.09.24

Якоб ВАН ДАЙК, почесний проф.

ORCID ID: 0000-0003-0304-2647

e-mail: vandyk@uwo.ca

Західний університет, Лондон, Онтаріо, Канада

НАСТАВНИЦТВО ДЛЯ МЕДИЧНИХ ФІЗИКІВ: КОЛИ ТА ЯК?

Освітні програми з медичної фізики можуть бути обмежені локальними викладацькими ресурсами та доступними технологіями. Сучасні технології візуалізації і терапії розвиваються швидкими темпами, що потребує постійної підтримки навчання для їх безпечного й ефективного впровадження в клініці. Наставництво надає важливий ресурс для заповнення цих освітніх прогалів та оновлення знань, що необхідні для розробки нових методик і впровадження нових технологій. Структуроване наставництво може бути корисним ресурсом на будь-якому етапі протягом кар'єри медичного фізика, хоча конкретна мета наставництва, імовірно, буде різною, залежно від моментів кар'єрної послідовності. Описано сім етапів структурованої програми наставництва та деякі вказівки до стійкої й успішної реалізації його діяльності: визначення мети наставництва; пошук партнерів для наставника / підопічних; створення умов для проведення; згода сторін; оцінювання; перевизначення; відокремлення. Запропоновано рекомендації з етикету і надано певні пояснення до них. Оскільки у деяких регіонах може спостерігатися дефіцит наставників із належним досвідом, то віртуальне наставництво з використанням інтернет-технологій може стати прийнятною альтернативою. Узагальнено результати глобального онлайн-опитування щодо віртуального наставництва. Структуроване наставництво може стати корисним ресурсом для медичних фізиків на будь-якому етапі їхньої кар'єри. Правильне розуміння якнайкращого спрямування в таких програмах наставництва збільшить їхні переваги.

Ключові слова: наставництво, етапи наставництва, етикет у наставництві, віртуальне наставництво, що можна і чого не можна робити в наставництві, медична фізика.

Член програмного комітету Я. Ван Дайк заявляє про відсутність конфлікту інтересів та невтручання в процес оцінювання цієї статті відповідно до міжнародних стандартів публікаційної етики. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The member of the Program committee J. Van Dyk declares no conflict of interest and has not interfered in the evaluation process of this article, in accordance with international publication ethics standards. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

Prodromos KAPLANIS, PhD (Biophys.), Senior Medical Physicist

Scopus ID: 6505920036

e-mail: pakaplanis@gmail.com

Nicosia General Hospital, Nicosia, Cyprus

HOW TO PREPARE FOR AI IN MEDICAL PHYSICS

By increasing diagnostic precision, streamlining treatment regimens, and boosting patient outcomes, the incorporation of Artificial Intelligence (AI) into medical physics holds the potential to completely transform the healthcare industry. This short article examines the most recent developments and uses of artificial intelligence (AI) technologies, emphasizing on Imaging, Therapy, and Quality Assurance. As far as imaging is concerned the article elaborates mainly on the applications of AI in CT, MRI, and PET images, but also ultrasound, mammography, and radiography. Therapy is one field that needs AI more than any other, as this article explains. Finally the applications of AI in Quality Assurance, are excellent tools for the Medical Physicist (MP), and the reasons for this, are explained. Whether or not there are any risks associated with the clinical application of AI-based tools is examined and which risks these might be. Challenges and ethical considerations, which according to many researchers are of the utmost importance, are also examined briefly.

Key words: *medical physics, artificial intelligence, imaging, therapy, quality assurance.*

Introduction

Artificial intelligence (AI) is changing many industries and completely changing how humans interact with technology. Fundamentally, artificial intelligence is the creation of computer programs that can carry out operations that would normally need human intelligence. This covers the ability to solve problems, make decisions, comprehend language, and even perceive visual stimuli. It's critical to realize that Artificial Intelligence (AI) is a broad term that covers a variety of technologies, including robots, machine learning, neural networks, and natural language processing.

One can understand artificial intelligence's significant influence on our daily lives and its potential to spur innovation in industries like healthcare, banking, and transportation by delving into the meaning of the term. One needs only to examine the rise of AI in any field, in Radiology for instance, and will instantly see the tremendous rise of its applications. Vision Research Reports in 2022 have predicted that by 2030 AI in Radiology Market will reach the amazing figure of 517 million USD, as shown in Fig. 1 below. Artificial intelligence is laying the groundwork for a more intelligent and productive future through systems like intelligent assistants, automated customer support, and sophisticated data analysis.

One widely used definition of AI, is that it is a field of computer science that focuses on developing computers that can carry out tasks that typically require human intelligence. In other words Artificial Intelligence, is the process of creating models and algorithms that let computers identify patterns, learn from data, and make judgements. This field includes several subfields, such as natural language processing,

which enables machines to comprehend and produce human language, and machine learning, which allows systems to become more proficient via experience.



Fig. 1. Radiology Market Size 2021 to 2030 in USD, (Vision Research Reports, 2022)

Medical Physics is undergoing a revolution thanks to AI, which has the unmatched potential to improve diagnosis and treatment by analyzing enormous volumes of data. Clinically qualified Medical Physicists (CQMPs) will be essential in guaranteeing the safe and efficient application of AI-based technologies as they continue to gain popularity in the medical field.

Applications of ai in medical physics. Imaging. The primary goal of applying AI and Machine Learning (ML) to imaging is to assist medical professionals in making disease diagnoses. One of the earliest uses of these new methods in the field of imaging is computer-aided diagnosis (CAD), which integrates machine learning classifiers that are trained to discriminate between lesions and healthy tissue (Avanzo et al., 2021). When ML was used to combine Computer Tomography (CT) textural data, lung CT results showed a high degree of accuracy in differentiating between invasive and less invasive lesions and malignant lesions.

By extracting many image features-up to a few hundred or thousands – quantitative analysis of radiological images – mainly CT, Magnetic Resonance Imaging (MRI), and Positron Emission Tomography (PET) images, but also ultrasound, mammography, and radiography – can be combined with ML classifiers to create prognostic and predictive models in the relatively new field of radiomics.

To shape lesions or organs, deep learning algorithms can directly learn the structure labelling of each picture voxel through a process known as semantic segmentation. PET-CT hybrid imaging has shown that U-net, one of the most widely used Deep Learning (DL) architectures for image segmentation, can automatically distinguish between lung tumours and lung parenchyma. The advantages of DL versus ML are shown in Fig. 2 below.

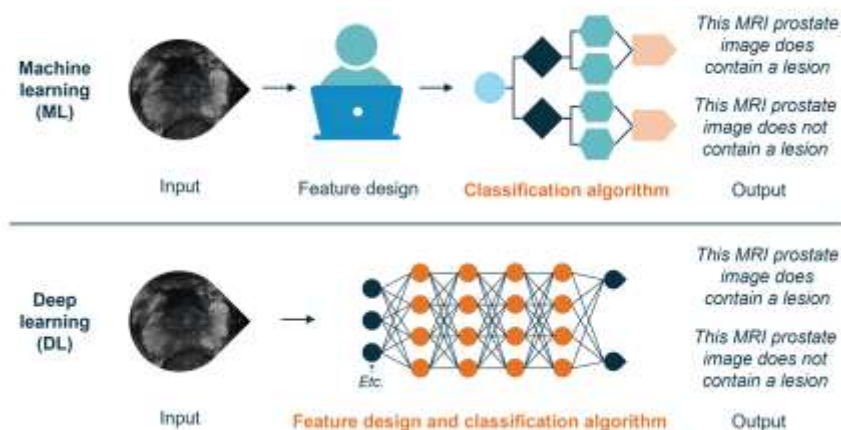


Fig. 2. Machine learning requires manual feature designing before the training of the algorithm can start.

Deep learning combines feature extraction and the training of the algorithm using a neural network (Fortunati, 2022)

Patients' dose estimation is essential to the optimisation of clinical imaging protocols because it enables the dose to be matched with image quality. Dose to the patient can be automatically determined by DL in CT, Single-Photon Emission Computed Tomography (SPECT), and PET. Skin dosage estimate using DL has been proposed in interventional radiology. ML could be used to identify exams that hold potential for dose reduction by adjusting the acquisition parameters, as well as predict the volumetric computed tomography dose index (CTDIvol) in chest CT based on scan patient metrics (scanner, study description, protocol, patient age, gender, and water-equivalent diameter (DW)).

Improving image quality is another essential component of patient dose optimization since it permits dosage reduction while maintaining the same level of quality. By incorporating AI algorithms into imaging technologies, patient dose can be decreased while also increasing imaging quality. DL techniques have been applied to enhance the quality of PET images, lower noise levels, eliminate streak artefacts from CT scans, and provide new methods for reconstructing tomographic images with less recorded data. A generation of synthetic images, such as virtual contrast-enhanced images, stiff/deformable intramodal and multimodal image registration, and the extraction of the respiratory signal that could be used for breathing motion compensation of images are other promising applications.

AI in interventional radiology uses patient characteristics and picture texture to predict tumour response to transarterial chemotherapy embolisation. In the future, intra-procedural fluoroscopy and high-resolution preoperative magnetic resonance imaging could be superimposed using real-time registration DL algorithms. This would help minimise damage to nearby structures and guide doctors during catheter manipulation for the purpose of estimating ablation margins.

As far as interventional cardiology is concerned new research shows AI-based automated quantitative coronary angiography (AI-QCA) holds promise for accurate analysis of heart disease, as shown in Fig. 3 below.

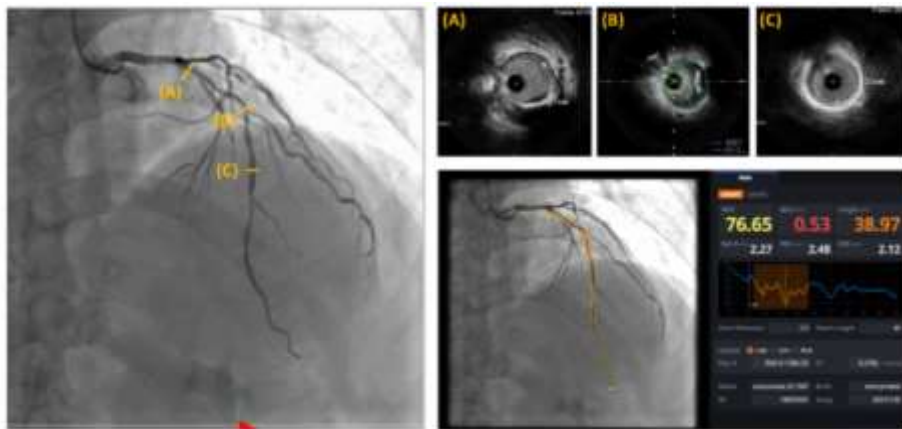


Fig. 3. A representative case in which artificial intelligence-based quantitative coronary angiography (AI-QCA) showed a good correlation with intravascular ultrasound (IVUS) observation (DAIC, 2023)

(DRD: distal reference diameter; %DS: percent diameter stenosis; LAD: left anterior descending artery; LCX: left circumflex artery; MLD: minimal luminal diameter; PRD: proximal reference diameter; RCA: right coronary artery; Ref.D: reference diameter)

AI has the potential to identify progress or recurrence at an early stage in longitudinal investigations by detecting tiny changes between images throughout treatment follow-up. AI can assist the specialist in diagnosing ocular problems like age-related macular degeneration, diabetic retinopathy, and others in the imaging fields of ophthalmic imaging, such as fundus digital photography and optical coherence tomography. Other fields of study include rheumatology and cardiology, which have a lengthy history of using AI applications to study and detect rheumatological symptoms, bone erosions, and cartilage loss.

AI is now widely used for tumor identification, subtyping, grading, staging, and prognostic prediction. This is mostly because of the advancement of computer vision algorithms and digital pathology, which was made possible by the emergence of whole-slide scanners. Proteomics and genomes may be combined in pathological diagnostics in the big-data era. A novel field called "spatial metabolomics" uses mass spectrometry and other imaging techniques to measure the distribution of molecules, including medicines, lipids, and metabolites, within bodily structures. Each pixel is represented by its mass spectrum. This technique appears interesting for the use of AI because it is characterised by a significant amount of high dimensional data, including overlapping and noisy chemical signals. Future AI applications could also concentrate on computer vision, which deals with digital picture feature and object recognition, and virtual assistants, which use speech recognition in radiology,

neuroradiology, and other fields. AI-generated data could improve the operator's view of the operating room environment through augmented reality.

Therapy. Machine Learning can be helpful for several tasks during the complete radiation treatment process, beginning with selecting the best radiation strategy, such as selecting contrast between photons and protons. Targets and organs at risk in radiation can be automatically segmented by a Convolutional Neural Network (CNN). ML-based auto-planning aims to reduce inter-user variability and improve quality and efficiency by simulating the iterative plan design, evaluation, and modifications made by skilled operators.

In order to establish achievable dose constraints or dose distributions that can be used to benchmark the quality of plans, knowledge-based approaches make use of a large database of previous treatment plans-up to thousands – to establish associations between geometric and dosimetric parameters from a selection of prior plans. For brachytherapy, ML-based autoplanning was also created. To expedite the process of determining the optimal dose distribution from the patient image, DL can forecast the dose distribution from radiation therapy treatment. ML was used to forecast intraoperative radiation dose in vivo and brachytherapy dose.

Dosomics, the use of radiomics or DL to analyse the dose distribution and then adjust it into a biologically effective dose to take into account various fractionations, has been studied recently for its potential to forecast radiation therapy adverse effects. Cone-beam CT (CBCT) scans obtained for image-guidance of radiation treatment can also be subjected to radiomics, which makes these scans valuable for data mining. A significant issue with radiation therapy is the patient's changing anatomy throughout treatment, which may lead to unintended dose adjustments. Rearranging the course of treatment is necessary in this instance. ML is able to recognise notable anatomical changes in patients during radiation therapy and forecast which patients will benefit from Adaptive Radiation Therapy (ART). A model classifier is depicted in Fig. 4 below, which uses imaging to distinguish between benign and malignant breast tumors. A recursive feature elimination and reduction method was used after many radiomic characteristics were first computed and the highly correlated features, the zero and near-zero variance features, were removed. Eleven features are identified as being at the saturation point by the model performance shown above. The blue curve (right) depicts the model's error function across the number of features, whereas the red curve (left) shows accuracy versus feature count. Using eleven imaging features in this case results in good accuracy and minimizes the error function.

Eventually, sensitive/resistant tumour sub-volumes that require a greater (or lower) dose may be detected using data from radiomics voxel-based analyses. This will allow for dose painting based on a "Radiomic Target Volume" (RTV). Radiometabolic therapy using sealed (microspheres, etc.) or unsealed (radiopharmaceuticals) sources is becoming more and more significant in nuclear medicine. By taking into consideration the architecture, activity distribution, tissue density, and planning of the patient, AI can enhance dosimetry by anticipating

treatment response, delivering the maximum dose to the target organ while sparing vital organs. The robustness of dosomic techniques has been investigated through methodological investigations.

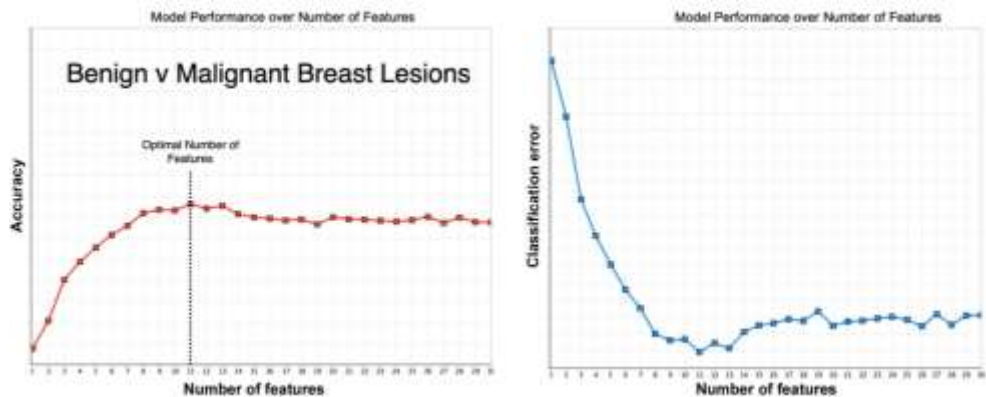


Fig. 4. Feature selection for radiomics

Quality Assurance. The International Organisation for Standardisation defines Quality Assurance (QA) as a system that guarantees the quality of a certain process, service, or product. The system's quality is determined by how well it satisfies requirements, which are needs or expectations that are expressed but typically implied or required, preventing errors and flaws. A product or process's description, measurement, analysis, improvement, and control are all achieved through the use of quality controls, or Quality Control (QC), tests. QC processes are utilised in radiological sciences to ensure that diagnostic and therapeutic devices and procedures, as well as clinician support systems, are verified and monitored. AI has the potential to automate quality control QC tasks that would be too time-consuming and impractical to complete by hand on a regular basis.

Without human assistance, AI quality control systems might be trained to become more accurate over time and create new tests. A major portion of the MP's work is quality assurance of radiotherapy (RT), which aims to prevent radiological incidents and incorrect radiation dosage administration. Several ML techniques have been investigated to forecast treatment plan errors in order to automate plan chart checks. To find faults in prostate plans, a K-means clustering algorithm was used to learn from previous plans.

Risks associated with the clinical application of ai-based tools. AI is a hot issue for clinical study and discussion, although there aren't many implemented AI-based solutions in use in clinics overall. There are several obstacles to overcome in the clinical, technological, safety, ethical, privacy, and regulatory domains when implementing AI in healthcare. If these issues are not resolved, they may act as a roadblock to more widely used AI in healthcare settings. Possible reasons for the caution around broader implementation of AI-based applications include the real risks of unintended and negative consequences, the lack of diversity, standardization,

and harmonization of data elements used to develop and train the AI-based models, the difficulties in their clinical implementation, validation, and quality assurance, the legal and ethical issues, and the lack of specialized education and training of the involved health professionals, (IAEA, 2023).

Challenges and ethical considerations. Although integrating AI into medical physics has revolutionary advantages, there are drawbacks and moral dilemmas to be resolved. Critical issues that require close consideration include preserving patient data confidentiality and privacy, mitigating algorithmic bias, and preserving transparency in AI decision-making procedures. The responsible and long-term application of AI in healthcare requires striking a balance between innovation and moral issues (Bollmann et al., 2024).

Discussion and conclusions

AI has the potential to broaden Medical Physicists' areas of expertise by extracting even more data to enhance medical care, and Medical Physicists are prepared to embrace the AI revolution. However, the Medical Physicists' expertise will be necessary for the safe and successful use of AI, particularly in the field of radiological sciences, and their participation in the multidisciplinary AI team is vital.

References

Avanzo, M., Trianni, T., Botta, F., Talamonti, C., Stasi, M., & Iori, M. (2021). Artificial Intelligence and the Medical Physicist: Welcome to the Machine. *Appl. Sci.*, 11, 1691. <https://doi.org/10.3390/app11041691>

Bollmann, S., Kustner, T., Tao, Q., & Zoller, F. (2024, Mar 23). Artificial intelligence in medical physics. *Z. Med Phys.*, 34(2), 177-178. <https://doi.org/10.1016/j.zemedi.2024.03.002>

DAIC. (2023). Revolutionizing Cardiology: AI-Based Technology Offers Accurate Analysis of Cardiac Disease. <https://www.dicardiology.com/content/revolutionizing-cardiology-ai-based-technology-offers-accurate-analysis-cardiac-disease>

Fortunati, V. (2022). *Machine learning requires manual feature designing before the training of the algorithm can start. Deep learning combines feature extraction and the training of the algorithm using a neural network.* <https://www.quantib.com/blog/deep-learning-applications-in-radiology/classification>

IAEA. (2023). Artificial Intelligence in Medical Physics, Series 83, Vienna, Austria.

Vision Research Reports. (2022). *Artificial Intelligence (AI) in Radiology Market.* <https://www.visionresearchreports.com/artificial-intelligence-in-radiology-market/39342>

Отримано редакцію збірника / Received: 15.06.24

Прорецензовано / Revised: 27.06.24

Схвалено до друку / Accepted: 30.09.24

Продромос КАПЛАНІС, д-р філософії (біофіз.), ст. мед. фізик

Scopus ID: 6505920036

e-mail: pakaplanis@gmail.com

Загальна лікарня Нікосії, Нікосія, Республіка Кіпр

ЯК ПІДГОТУВАТИСЯ ДО ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В МЕДИЧНІЙ ФІЗИЦІ

Впровадження штучного інтелекту (ШІ) у медичної фізики може повністю змінити сферу охорони здоров'я завдяки підвищенню діагностичної точності, оптимізації схем лікування та покращенню результатів лікування пацієнтів. Проаналізовано найновіші розробки та застосування технологій штучного інтелекту

з наданням особливого значення саме візуалізації, терапії та забезпеченню якості. Щодо застосування ШІ у візуалізації здебільшого розглянуто технології КТ, МРТ і ПЕТ, ультразвукової інтроскопії, маммографії та рентгенографії. Пояснено, чому терапія – це сфера, яка найбільше потребує ШІ. Показано, що застосування ШІ в забезпеченні якості є чудовим інструментом для медичного фізика (МФ). Вивчено існування ризиків, що пов'язані з клінічним застосуванням інструментів на основі ШІ. Коротко розглянуто виклики та міркування щодо етичності, які, на думку багатьох дослідників, надзвичайно важливі.

Ключові слова: *медична фізика, штучний інтелект, візуалізація, терапія, забезпечення якості.*

Член програмного комітету П. Капланіс заявляє про відсутність конфлікту інтересів та невтручання в процес оцінювання цієї статті відповідно до міжнародних стандартів публікаційної етики. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The member of the Program committee P. Kaplanis declares no conflict of interest and has not interfered in the evaluation process of this article, in accordance with international publication ethics standards. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

UDC 001.8

DOI: <https://doi.org/10.17721/3041-1491/2024.11-03>

Todorka L. DIMITROVA, PhD, Assoc. Prof.

ORCID ID: 0000-0003-1720-4715

e-mail: tdimitrova@abv.bg, doradimitrova@uni-plovdiv.bg

University of Plovdiv "Paisii Hilendarski", Plovdiv, Bulgaria

Rada BORISOVA, Expert in Medical Physics

e-mail: r.borisova@gmail.com

Radiotherapy and Radiosurgery Department,

University Hospital Sofamed, Sofia, Bulgaria

BRINGING UP-TO-DATE RADIOTHERAPY TRAINING FOR MSc STUDENTS: A METHODOLOGICAL APPROACH

The field of radiotherapy is pivotal in contemporary cancer treatment, necessitating comprehensive training programs to cultivate skilled professionals. This paper explores the essential components of radiotherapy training, encompassing theoretical education, practical experience, and the integration of new technologies, as implemented in an introductory Radiotherapy Physics course within the MSc Medical Radiation Physics and Technique program at the University of Plovdiv "Paisii Hilendarski". Additionally, it addresses the challenges and advancements in the field, highlighting the importance of continuous education and professional development.

Key words: *medical physics, radiotherapy physics, radiotherapy practical training, education.*

Introduction

Short notes on the Medical Physics Education in Bulgaria. Over the past decade, the field of Medical Physics has experienced a notable increase in popularity, largely attributed to its formal recognition as a profession by the International Labour Organization (ILO) in 2012. Radiotherapy, an essential modality in cancer treatment, utilizes high-energy radiation to target and destroy malignant cells. The efficacy of radiotherapy is critically depending on the expertise of trained professionals who design and implement individualized treatment plans. This is a domain where the skills of medical physicists are extensively applied and highly valued. Consequently, training students in radiotherapy is of paramount importance.

Although Medical Physics training is no longer a novel concept, its development in Europe underwent a comprehensive process of international law harmonization beginning in 1994 at the European Conference on Post-Graduate Education in Medical Radiation Physics (Roberts, Tabakov, & Lewis, 1995), and only recently concluded. Bulgaria has been actively involved in this process and was among the first countries to implement a structured approach to graduate and postgraduate Medical Physics education. It was established during the last decade of the XX century at the University of Plovdiv "Paisii Hilendarski", at the University of Sofia "St. Kliment Ohridski", at and at the University of Shumen "St. Konstantin Preslavski" (Dimitrova, Hristov, & Milieva, 2011; Litov, & Dimitrova, 2010). The

© Dimitrova Todorka L., Borisova Rada, 2024

programs in Plovdiv and Sofia are only active at the time being. However, the scope, duration, and emphasis of their curricula vary, as they fall under the academic authority of each university, resulting in a lack of a centralized and unified approach to the skills and knowledge imparted during education (Димитрова, 2014).

Two Postgraduate Specializations were delivered by the National Center for Radiobiology and Radiation Protection, Ministry of Public Health, since 1982 – Medical Radiological Physics and Medical Sanitary Physics (Minister of Health, (2018). Currently the postgraduate programs for medical physicists are running at the Medical University of Sofia and at the Medical University of Varna.

Recently a joint MSc program in Medical Physics in English was established between the two main academic institutions in Bulgaria – the University of Sofia and the University of Plovdiv (Todorka, & Dimitrova, 2021). It has combined the advantages of both universities' programs and has involved the best lecturers and clinical specialists. Since the joint program is in English, both universities have kept their original and slightly different programs in Bulgarian.

The involvement of qualified experts in Radiation Protection during any activity with ionizing radiation in Bulgaria, including medical applications, is mandated by EC Directive 97/43/Euratom (European Commission, 1997). The academic education and training in Medical Physics (MP) is aligned with the EFOMP and IOMP Policy Statements (European Commission, 1997; EFOMP, 1984a, 1984b, 1998; IOMP, 2012a, 2012b). The statute of Medical Radiological Physicists is established through state regulations for Standard in Radiotherapy (IOMP, 2012b) and Standard in Medical Imaging (Министър на здравеопазването, 2021), and the regulation for Radiation Protection in Medical Treatment of the Personnel (Министър на здравеопазването, 2018).

According to IOMP Policy Statement No. 2, the minimum educational qualification for a Medical Physicist is a university degree or equivalent (level corresponding to a master's degree) majoring in medical physics or a related scientific field (IOMP, 2012b). This also includes requirements for professional training and certification. Recently, the medical physics community in Bulgaria has achieved this standard.

In 2022 the professions "Physicist, Medical Physics" (code 21117026) and "Physicist, Medical Physics Expert" (code 21117027) were incorporated into the National Classification of Occupations and Nominations (NCPD) under the proposal of the University of Plovdiv and the University of Sofia. This inclusion was supported by the Bulgarian Society of Biomedical Physics and Engineering (BSBPE), The Union of Scientists in Bulgaria – Plovdiv (USB – Plovdiv), the National Center for Radiobiology and Radiation Protection (Ministry of Public Health), and the Medical Universities Hospitals in Plovdiv and Sofia.

The profession "Physicist, Medical Physics" requires a master's degree in medical physics. The profession "Physicist, Medical Physics Expert" requires a master's degree in medical physics, and a three-year postgraduate specialization, including

5 years of clinical practice after that. The specializations in Radiation Medical Physics are dedicated to Medical Imaging, Nuclear Medicine and Radiation Therapy.

In recent years, practical training in radiotherapy at the university level was limited for various reasons. Our students visited the Radiotherapy Clinic at the Saint George University Hospital for Active Treatment, where they were introduced to all facilities, including accelerators, Cyberknife, and treatment planning rooms. They had opportunities to discuss different issues with clinical medical physicists and radiation therapy doctors. Many students prepared their diploma theses at this clinic. However, only graduates employed in a radiotherapy department were able to perform hands-on training in treatment planning.

We have recently adopted a new approach to involve students more actively in practical sessions. In this paper, we provide an in-depth analysis of the training program, methodologies, and challenges faced in preparing students for careers in radiotherapy, as implemented in the introductory Radiotherapy Physics course within the MSc Medical Radiation Physics and Techniques program at the University of Plovdiv "Paisii Hilendarski". The training was conducted at the Radiotherapy and Radiosurgery Department of Pulmed University Hospital in Plovdiv.

Overview of the Radiotherapy Physics Course at the University of Plovdiv "Paisii Hilendarski". The MSc program in Medical Radiation Physics and Techniques at the University of "Paisii Hilendarski" was introduced in 1997 as part of the EC TEMPUS S-JEP09826 PHARE project (Roberts, Tabakov, & Lewis, 1995). The current MSc program has preserved the TEMPUS core courses while adapting to the recent development in this field and the new accreditation requirements (Dimitrova, 2014a, p. 127–130; Dimitrova, 2014b, p. 254–261; Dimitrova, 2015).

During the past decades, Radiotherapy Physics curricula have focused predominantly on theoretical disciplines. While this approach provides Medical Physics graduates with a good understanding of the theoretical principles underlying Physics application in medicine, it leaves them somewhat lacking in practical skills, creating a gap between university-level training and the hands-on abilities required for a successful career in radiotherapy. Recently, several new radiotherapy sites were established in Bulgaria, and existing departments have upgraded their facilities with modern radiotherapy equipment. This development has significantly increased the demand for skilled medical physicists in the field. As educators, we felt a responsibility to update and enhance the existing Radiotherapy Physics course curriculum. Our goal was to align it with contemporary advances in modern radiotherapy and to make it more relevant to the current needs and requirements of the radiotherapy physics profession. The MSc program in Medical Physics is structured as a three- or four-semester education, depending on the prior training of the enrolled students. Students without fundamental Physics background (Chemistry, Biology and Engineering) are required to undertake an additional semester of coursework. The Radiotherapy Physics course is offered in the second semester of the first year, comprising 30 hours of lectures, 15 hours of seminars and 15 hours of practical training.

Aiming to enhance the learning experience, each lecture adhered to a standardized structure: a brief outline of the scope, clearly stated learning objectives, a comprehensive and systematically organized exposition of the topic under discussion, and several slides at the end, summarizing the key points.

The initial part of the course maintains a predominantly theoretical focus. However, basic topics covered in detail in previous modules of the MSc program were reduced or excluded altogether. Main topics included a brief summary of interactions of ionizing radiation with matter, presented from the perspective of their significance in the range of modalities used in radiotherapy, basic properties of clinical photon and electron beams, and essential radiobiological concepts such as fractionation rationales and the LQ model. Cobalt-60 teletherapy machines and orthovoltage X-ray units were also included, however the focus was on contemporary linear accelerators, including C-arm and ring linacs, Cyberknife, and specialized systems for radiosurgery.

The second part of the course was focused on the practical aspects of the medical physicist's role and responsibilities in radiotherapy. It included a detailed demonstration of the workflow in a radiotherapy clinic, starting from the initial CT scan of the patient to the final treatment delivery. Emphasis was placed on the use of various imaging modalities for volume contouring and patient position verification. Additionally, a specialized lecture was also delivered to address the various types of planning tools and strategies available, as well as the procedures for preparing dosimetric plans for common treatment sites such as pelvis, breast, head-and-neck, etc. Students were also introduced to basic concepts in advanced treatment planning and delivery techniques such as intensity-modulated radiation therapy (IMRT), volumetric modulated arc therapy (VMAT), image-guided radiation therapy (IGRT) and surface guided radiation therapy (SGRT). Finally, a dedicated lecture on quality assurance (QA) was added to the curriculum, covering basic concepts in quality management in radiotherapy.

Practical Session. A significant modification introduced this year in the Radiotherapy MSc course was the reorganization of practical sessions. The specificity of practical training necessitates close cooperation with hospitals, which is often arduous to implement. This poses several challenges in ensuring students receive adequate practical experience. In previous years, practical sessions were conducted as formal visits to clinical radiotherapy departments, where students observed key workflow points. The sessions were conducted by members of the local medical physics staff, typically individuals with extensive work experience but limited academic skills. These staff members were responsible for selecting the topics and information to be included, as well as determining the manner in which they were presented.

This year, a more integrated approach was adopted to bridge the gap between theoretical knowledge and practical skills. The practical sessions were conducted in a new radiotherapy center at Pulmed University Hospital, experienced in all major modern radiotherapy applications. Importantly, the sessions were led by Plovdiv University staff

rather than local medical physicists, thus ensuring better coherence between the lectures and practical training. The practical session was divided into five parts as follows.

1. **Linear accelerator construction and principle of operation.** The department was equipped with two linear accelerators: a C-arm linac specifically designed for radiosurgery treatment and a fast-rotating O-ring linac (Fig. 1). Students had the opportunity to examine both types of accelerators, including inspecting some of the internal components, discussing the functions of the main parts, and assessing the differences between the two designs.



Fig. 1. O-ring linear accelerator Halcyon - view under the covers

2. **Patient pathway in a radiotherapy department.** Students participated in a comprehensive tour of the department, which followed the entire radiotherapy preparation and delivery process. At each stage, detailed explanations and demonstrations were provided to elucidate the procedures involved. The main steps of the tour are listed below.

CT-scanning: Discussion of main differences between diagnostic and radiotherapy scanners, main scanning parameters and reconstruction options. Demonstration of different pieces of immobilization equipment, their construction, functionalities and application (Fig. 2). Discussion of workflow: immobilization, CT-scanning, patient mark-up, CT image reconstruction and image transfer to the treatment planning system.



Fig. 2. Demonstration of head-and-neck immobilization

3. **Visual demonstration of basic properties of photon and electron beams.** The basic properties of clinical photon and electron beams were comprehensively discussed during the lectures, particularly regarding the dependence of dose distribution on source-to-surface distance (SSD), depth of irradiation, beam energy, and field geometry. A visual demonstration was conducted using a digitally generated water phantom in the treatment planning system to illustrate how variations in these parameters affect the dose distribution.

4. **Demonstration of selected Quality Assurance activities.** Due to the constraints on time available for practical sessions in the department, a selected number of quality assurance (QA) procedures were demonstrated and explained to the students. These included the integrated daily check of basic linac parameters, output constancy measurement using an ion chamber positioned in a water-equivalent plastic phantom, and isocenter size verification for gantry and collimator rotation (Fig. 3).

Contouring: Summary of planning volumes used in radiotherapy with visual demonstration of examples for two common treatment sites: lung and prostate. Summary and demonstration of critical structures relevant to different localizations.

Planning: Review of 3D-conformal planning techniques and demonstration of example plans for breast and prostate. Demonstration of IMRT and VMAT optimization process. Basic properties and functionalities of optimization cost functions. Plan assessment using dose-volume histograms (DVH) for target and organ-at-risk structures.

Dosimetric verification: Review of basic concepts of dosimetric verification of the treatment plan. Demonstration of 2D-dosimetric verification using Electronic Portal Imaging Device (EPID) and gamma-analysis, including typically used clinical tolerances and interpretation of results.



Fig. 3. Demonstration of output constancy check with solid water phantom as part of linac daily

Patient position verification and treatment delivery: review of patient position verification strategies and demonstration of 2D and 3D-image matching techniques.

5. Manual calculation of monitor units (MU) required to deliver prescription dose to the target.

While it is acknowledged that in the contemporary era of fully computerized treatment planning, the need to manually calculate the monitor units (MU) required to deliver a prescription dose to a specific point within an irradiated volume is rare, the authors believe that this is a powerful educational tool for consolidating the understanding of dose dependence on various treatment parameters. Therefore, it was included in the course both as part of class discussion and as a set of individual problem-solving tasks for students designed to reinforce fundamental dosimetric concepts.

Discussion and conclusions

Summary and Perspectives. The feedback received at the end of the course was overwhelmingly positive. Learners commended the clarity and systematic organization of the presentations, which improved their understanding of the material. The summary slides at the end of each lecture were particularly well-received, for their role in effectively recapping key points and facilitating review and retention of the course content.

The practical session garnered favorable responses as well. It provided a valuable opportunity for trainees to gain a visual and hands-on understanding of the theoretical knowledge they had acquired. This integration of practical experience with theoretical instruction was praised for helping learners bridge the gap between abstract concepts and real-world application, thereby enriching their overall educational experience.

Overall, the course was lauded for its comprehensive approach, combining clear and structured theoretical instruction with practical learning opportunities. This methodology not only reinforced the learners' understanding of complex concepts but also prepared them more effectively for professional practice in the field of radiotherapy.

One notable shortcoming of the course was that, despite our best efforts, the practical session remained primarily demonstrative in nature. Consequently, students did not receive an adequate amount of one-on-one, hands-on experience. This limitation has been identified as a critical area for improvement in future iterations of the course.

To address the limitations of the current course structure, the department of Physics at the University of Plovdiv has recently acquired a commercial treatment planning system for educational purposes only, thanks to the project EU project BG05M2OP001-2.016 – Modernization of higher education institutions, Operational Program Science and Education for Smart Growth (European Commission, 2014). The System will be integrated into the curriculum of the Radiotherapy Physics course. This radiotherapy planning will be integrated into the curriculum of the Radiotherapy Physics course. Advanced technology will enable students to actively engage in the creation of treatment plans themselves, rather than merely observing demonstrations. The inclusion of this system is designed to provide students hands-on experience, fostering a more interactive and immersive learning environment. By allowing students to apply theoretical knowledge in a practical setting, this approach aims to improve their practical skills and better prepare them for professional careers in radiotherapy. We are confident that the integration of this new planning system will effectively address existing curriculum limitation and will address the current limitations and lead to a more comprehensive and effective educational experience for future cohorts.

Authors' contribution: both authors – Todorka L. Dimitrova and Rada Borisova contributed equally to this paper in terms of methodology conceptualization, implementation and writing of the manuscript.

Acknowledgements, sources of funding. The authors would like to express their sincere gratitude to Pulmed University Hospital and its Radiotherapy and Radiosurgery Department for providing the opportunity to conduct the practical training on their premises. Their support and resources were invaluable to the successful completion of our work.

The authors thank project EU project BG05M2OP001-2.016 - Modernization of higher education institutions, Operational Program Science and Education for Smart Growth for supplying a commercial treatment planning system for educational purposes.

References

- Roberts, C., Tabakov, S., & Lewis, C. (Eds.). (1995). *Medical radiation physics: a European perspective*. King's College School of Medicine and Dentistry. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1234567>
- Dimitrova, T. L., Hristov, H., & Milieva, E. (2011). Medical physics education and training in Bulgaria. *Medical physics – the current status, problems, the way of development. High technologies, First International Workshop* (June 02-03, Kyiv, Ukraine, 24–29).
- Dimitrova, T.L. (2014a). Examples of good European practices in medical physics education. *XLII National Conference on Physics Education Issues "World Educational Standards, Comparative Measurements and Physics Education in Bulgaria"* (Stara Zagora, September 8–11, pp. 127–130)

[in Bulgarian]. [Димитрова, Т.Л. (2014). Примери за добри европейски практики в обучението по медицинска физика. *XLII Национална конференция на въпросите на обучението по физика „Световни образователни стандарти, сравнителни измервания и образованието по физика в България“* (Стара Загора, 8–11 септември, сс. 127–130)].

Dimitrova, T.L. (2014b). Education in medical physics in Europe – modern and up-to-date. *Physics: Teaching Methodology*, 2(4), 254–261 [in Bulgarian]. Димитрова, Т.Л. (2014b). Обучението по медицинска физика в Европа – модерно и актуално. *Физика: Методология на обучението*, 2(4), 254–261].

Dimitrova, T.L. (2015). "Medical physicist" – a modern and promising profession, *World of Physics*, 1, 44–49 [in Bulgarian]. [Димитрова, Т.Л. (2015). "Медицински физик" – модерна и перспективна професия, *Светът на физиката*, 1, 44–49].

EFOMP. (1984a). *Medical Physics Education and Training: The Present European Level and Recommendations for its Future Development*. Policy statement No. 1.

EFOMP. (1984b). *The Roles, Responsibilities and Status of the Clinical Medical Physicist*. Policy statement No. 2.

EFOMP (1998). *Continuing Professional Development for the Medical Physicist*. Policy statement No. 8.

European Commission. (1997). Council Directive 97/43/EURATOM of 30 June 1997 on health protection of individuals against the dangers of ionizing radiation in relation to medical exposure. *Official Journal of the EC*, L180, V22.

European Commission. (2014). *Operational Programme "Science and Education for Smart Growth"*. https://ec.europa.eu/regional_policy/en/atlas/programmes/2014-2020/bulgaria/2014bg05m2op001

IOMP. (2012a). *The Medical Physicist: Role and Responsibilities*. Policy Statement No. 1. IOMP Working Group on Policy Statement No. 11 (10 August 2010. Approved by the IOMP Council). WC, Beijing, China.

IOMP (2012b). *Basic Requirements for Education and Training of Medical Physicists*. Policy Statement No. 2. IOMP Working Group on Policy Statement No. 21 (10 August, 2010. Approved by the IOMP Council). WC, Beijing, China.

Litov, L., & Dimitrova, T. L. (2010). Education in medical physics in Bulgaria. *Medical Physics in the Baltic States*, 1, 6–10.

Minister of Health. (2018, February 9). *On the terms and conditions for ensuring the protection of persons during medical radiation* (Ordinance No. 2 of February 5, 2018), published DV. No. 13 [in Bulgarian]. [Министър на здравеопазването. (2018, 9 Февруари). *За условията и реда за осигуряване на защита на лицата при медицинско облъчване* (Наредба № 2 от 5 февруари 2018), обн. ДВ. бр. 13].

The Minister of Health. (2018). For approval of medical standard "Imaging diagnostics" (Ordinance No. 9 of July 13, 2018) [in Bulgarian]. [Министър на здравеопазването. (2018). *За утвърждаване на медицински стандарт „Образна диагностика“* (Наредба No 9 от 13 юли 2018)].

The Minister of Health. (2021). For approval of the medical standard "Radiation treatment" (Ordinance No. 6 of January 29, 2010, SG No. 63 of July 30, 2021) [in Bulgarian]. [Министър на здравеопазването. (2021). *За утвърждаване на медицински стандарт „Лъчелечение“* (Наредба № 6 от 29 януари 2010 г. ДВ. бр. 63 от 30.07.2021)].

Todorka, L., & Dimitrova, T. (2021). Master's Program in Medical Physics in English. *Medical Physics in the Baltic States. Proceedings of International Conference "Medical Physics 2021", 4-6 November* (Kaunas, Lithuania, pp. 201–203).

Отримано редакцію збірника / Received: 04.07.24

Прорецензовано / Revised: 15.07.24

Схвалено до друку / Accepted: 30.09.24

Тодорка ДІМІТРОВА, д-р філософії, доц.

ORCID ID: 0000-0003-1720-4715

e-mail: tldimitrova@abv.bg, doradimitrova@uni-plovdiv.bg

Пловдивський університет "Паїсій Хилендарський", Болгарія

Рада БОРИСОВА, експерт з медичної фізики

e-mail: r.borisova@gmail.com

Університетська лікарня Софіямед, Софія, Болгарія

ВПРОВАДЖЕННЯ СУЧАСНОЇ ПІДГОТОВКИ З ПРОМЕНЕВОЇ ТЕРАПІЇ ДЛЯ СТУДЕНТІВ-МАГІСТРІВ ІЗ МЕДИЧНОЇ ФІЗИКИ: МЕТОДОЛОГІЧНИЙ ПІДХІД

Сфера променевої терапії є вирішальною для сьогочасного лікування раку, що вимагає комплексних навчальних програм для плекання кваліфікованих фахівців. Досліджено основні складові навчання променевій терапії, що охоплює теоретичну освіту, практичний досвід та інтеграцію нових технологій, як це реалізовано у вступному курсі фізики променевої терапії в магістерській програмі з медичної радіаційної фізики та техніки в Університеті Пловдива "Паїсій Хилендарський". Окрім дослідження основних складових навчання променевій терапії, розглянуто проблеми та досягнення в цій галузі, а також наголошено на важливості безперервної освіти й професійного розвитку.

Ключові слова: *медична фізика, фізика променевої терапії, променева терапевтична практика, освіта.*

Автор Р. Борисова заявляє про відсутність конфлікту інтересів. Член програмного комітету Т. Дімітрова заявляє про відсутність конфлікту інтересів та невтручання в процес оцінювання цієї статті відповідно до міжнародних стандартів публікаційної етики. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The author R. Borysova declares no conflict of interest. The member of the Program committee T. Dimitrova declares no conflict of interest and has not interfered in the evaluation process of this article, in accordance with international publication ethics standards. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

UDC 614:615.84(485):616-07/-.08:355.01(470:477)
DOI: <https://doi.org/10.17721/3041-1491/2024.11-04>

Jack VALENTIN¹, PhD (Genetics)
ORCID ID: 0000-0003-3364-3355
e-mail: jack.valentin@ki.se

Christel HEDMAN¹, DSc (Med.), Prof.
ORCID ID: 0000-0003-4183-7598
e-mail: christel.hedman@ki.se

Marita LAGERGREN LINDBERG¹, DSc (Med.)
ORCID ID: 0000-0002-8703-4320
e-mail: marita.lagergren@ki.se

Karin LINDBERG¹, DSc (Med.)
e-mail: karin.lindberg@ki.se

Leif STENKE¹, DSc (Med.)
ORCID ID: 0000-0002-3554-576X
e-mail: leif.stenke@ki.se

¹Karolinska Institutet, Stockholm, Sweden

MEDICAL PREPAREDNESS AND PATIENT MANAGEMENT IN SWEDEN

In the light of the current war waged by Russia against Ukraine, the Swedish medical regulatory authority has asked the Swedish Radiation Emergency Medicine Centre (SREMC, the national WHO REMPAN liaison institute and an EBMT member dept) to provide advice on the medical consequences of high exposures to ionising radiation and the management of highly exposed persons. As a starting point, SREMC used a worst-case scenario (provided by the Swedish Defence Research Agency) of a nuclear weapon explosion at a Swedish coastal town. Our advice discussed four situations: 1) Radiation incident at a Ukrainian NPP (unlikely to seriously affect the Swedish population); 2) Spectator case of a nuclear weapon explosion in a neighbour country (limited effects for the Swedish population); 3) Requests for assistance with medical care in Sweden for Ukrainian radiation victims (a possible result of cases 1 and 2); and 4) Nuclear weapon explosion in Sweden (disastrous consequences for the Swedish population). We described the likely medical effects and suggested how medical establishments might prepare for these cases. In a second document, we suggested what medical countermeasures the authorities should stockpile. Finally, we list some desirable future developments in radiation emergency medicine.

Key words: *emergency planning, nuclear explosions, radiation harm, ARS, MCM.*

Introduction

The Russian full-scale invasion of Ukraine has aroused fears of threats to health and safety due to radiation incidents at nuclear power plants or even use of nuclear weapons. Hence the National Board of Health and Welfare (the Swedish medical regulatory body) has requested the Swedish Radiation Emergency Medicine Centre (SREMC, which is the national WHO REMPAN liaison institute, and a member department of EBMT NAC, the nuclear accident committee of the European blood and marrow transfusion group) to provide information about the medical results of

high doses of ionising radiation, and advice on how medical institutions could prepare for the management of affected patients.

Aided by a worst-case scenario of a ground level 100 kton nuclear explosion on a November weekday with no previous warning, at the small Swedish coastal town of Nynäshamn, devised by the Swedish Defence Research Agency, Goliath et al. (2021), SREMC outlined 4 cases to consider in the planning:

1) *A radiation incident at a Ukrainian nuclear power plant.* Attacks on, or careless activities at, nuclear installations could, in unfortunate circumstances, lead, to uncontrolled releases of radioactive material over large areas, with consequences similar to those after the 1986 Chornobyl accident (UNSCEAR, 2008) or the 2011 Fukushima accident (UNSCEAR, 2022). While such events could become challenging for people in the Ukraine, it is very unlikely that they would necessitate in Sweden any health protective actions like sheltering or stable iodine intake. Some restrictions on foodstuffs and agriculture could become advisable, though.

2) *The 'spectator case' of a nuclear weapon explosion in a neighbour country.* If a nuclear weapon is employed in Ukraine, the local consequences would of course be very serious, but due to the distance the effects in Sweden would be limited. A first approximation of the possible results could be gleaned from the 'Nynäshamn scenario' mentioned above. Neither sheltering, relocation, nor intake of stable iodine would be relevant, but if the weather conditions lead to radioactive fallout in Sweden, restrictions on foodstuff production may become necessary.

3) *Requests for assistance with medical care in Sweden for Ukrainian radiation victims.* Both case 1 and case 2 above could conceivably generate appeals to the Swedish (and other) governments requesting such assistance. If such a potential appeal were received, it is reasonable to assume that Sweden would accept a limited number of patients for treatment and care, either through existing bilateral assistance agreements, via assistance arrangements which are in place via UN and EU (Swedish Government, 2024), or perhaps through the EBMT network of some 600 clinics in Europe (<https://www.ebmt.org/nuclear-accident-committee>). According to preliminary assessments, a handful of patients with Acute Radiation Syndrome (ARS) could be treated at highly specialised haematology units in Sweden.

4) *A fictitious nuclear weapon ground-level explosion in Sweden.* In the 'Nynäshamn scenario' referred to above, over 90% of the 14 000 population would die, primarily due to trauma and burns, but many ARS cases would also ensue. Significant devastation of the infrastructure and high levels of radiation from deposition of radioactive particles would make rescue operations practically impossible within a few km from the explosion site. Depending on weather conditions, radioactive fallout at longer distances (50–100 km from the explosion site) could also lead to radiation levels causing lethal acute radiation harm within hours/days/weeks.

A nuclear explosion well above rather than at the ground level would generate much less radioactive fallout, but would also significantly increase the area where trauma and burns are induced,

Medical consequences. 'Deterministic', usually acute, tissue/organ reactions include skin damage, ranging from erythema and epilation to burns and wounds; temporary or permanent sterility; antenatal brain damage (but other radiation-induced malformations are rare in humans); and Acute Radiation Syndrome (ARS) with haematological, gastro-intestinal, and central nervous system subsyndromes. Long-term exposures can also lead to a Chronic Radiation Syndrome (Akleyev, 2021). 'Stochastic', late effects include cancer and (very rarely) genetic effects. Radiation can also contribute to multifactorially determined conditions such as coronary heart disease. Useful summaries and background information are available in UNSCEAR (1988), Kai et al. (2020), and Valentin and Stenke (2022).

Symptoms of ARS, or other deterministic radiation harm, depend on the absorbed dose of radiation. At doses exceeding 8–10 Gy, nausea, vomiting and disturbed consciousness will set in within minutes to hours. Palliative care is called for, but life-saving efforts are regarded as hopeless. At somewhat lower doses the initial prodromal symptoms are milder and may be followed by some days or weeks with no complaints, then followed by bleeding and infections due to serious bone marrow failure. For such patients, adequate hospital care (preferably at specialised haematological units and/or burns centres in collaboration with other specialists) can be curing and life-saving.

For triage and classification of patients on the basis of prodromal symptoms and blood tests, the pocket guide of EBMT NAC (2017) and the web applications of REAC/TS (Oak Ridge Institute for Science and Education, 2021) and REMM (2024) are recommended. Table 1 summarises data from primarily EBMT (2017) and ICRP (2005; Stewart, et al., 2012; Kai et al., 2020) for initial assessment of radiation victims and suggests levels of medical care.

A further medical complication is that in many possible scenarios, radiation victims are likely to suffer from combined injuries, frequently with surgical trauma and burns which add to the risk of serious infections and impair the prognosis. Patients exposed to lower doses, less than about 1 Gy, will not develop ARS. While not needing hospital care for their radiation exposure, they may need to have their doses assessed, and be offered outpatient follow-up. There will also be persons with very low or no doses, some in shock or other extreme stress and some 'worried well' who will require balanced medical information.

Administrative recommendations. SREMC and the Board of Health and Welfare also suggested a number of actions to be taken by regional medical authorities, as listed in Table 2.

Stockpiling of medical countermeasures (MCM). SREMC has also provided advice to the National Board of Health and Welfare regarding specific pharmaceuticals that should be stockpiled for acute use in case of a major radiation incident. The advice does not focus on risks of late harm or long-term needs of medications. Again, the "Nynäshamn scenario" mentioned above was used as an input to the planning. WHO (2023) has issued advice on national storage of pharmaceuticals useful in radiological and nuclear emergencies. The US Food and Drug Administration has approved a number of pharmaceuticals for radionuclear emergencies under the 'Animal rule', see. MacVittie and Farese (2021) and FDA (2024).

Table 1

**A scoring table for initial assessment of irradiated patients
and suggested level of care**

Level of care Clinical observation*)	Score I Outpatients	Score II Hospital care Curing intent	Score III Hospital care Palliative intent
Time from exposure to debut of symptoms	< 12 h	< 5 h	< 30 minutes
Erythema	0	+/-	+++ within 3 h
Asthenia	+	++	+++
Nausea	+	+++	(-)
Vomits per 24 h	Max 1	1-10	> 10, serious
Stools/diarrhoeas / 24 h	Max 3, shaped	2-9, soft	> 10, watery
Abdominal pain	Minimal	Intensive	Unbearable
Headache	None	Manifest	Unbearable
Temperature	< 38° C	38° - 40° C	> 40° C
Systolic blood pressure	Normal	Normal or a bit low	< 80 mm Hg
Temp. loss of conscience	0	0	+/-coma
Lymphocytes at 24 h in blood	> 1.5*10 ⁹ /l	< 1.5*10 ⁹ /l	< 0.5*10 ⁹ /l
at 48 h	> 1.5*10 ⁹ /l	< 1.5*10 ⁹ /l	< 0.1*10 ⁹ /l
Medical actions	Polyclinical follow-up Benign prognosis	Highly specialised haematological care (antibiotics, transfusions, cytokines etc) Grave, but care increases survival probability	Palliative care Even if blood formation is restored (maybe with stem cell transplantation), Multi-Organ Failure will follow Survival unlikely
Representative whole-body dose**)	~(500) 1000 – 2000 mSv	~2000 – 8000 mSv	More than ~8000 mSv

*) Clinical observations 1-2 days after a single whole-body exposure to ionising radiation

**) While more familiar to laymen, the unit mSv refers to effective dose and is not defined for doses exceeding 1000 mSv. The values really refer to absorbed doses in mGy, where however the numerical value in many cases agrees with values stated in mSv.

Table 2

**Actions to be taken by regional medical authorities in preparation
for a possible foreign nuclear explosion**

Short-term (as soon as possible)	
Where/what	Action
Pre-hospital organisation, A&E depts, emergency care wards	Update and rehearse medical RN plans
Measurements	Co-ordinate, nationally (through radiation regulator) and locally, have medical physicist stationed at A&E dept
Contaminated patients	Check equipment, rehearse decontamination
Health care providers	Prepare to receive a few foreign ARS and/or trauma patients at specialist units; formalise medical management, check resources
Longer term	
Set up a training and education programme. What is already available? What support is required, and from whom?	

The SREMC advice points out that patients who have been exposed to radiation may need both specific medical countermeasures, which are not used in other contexts and should therefore be stocked and supplied by the national healthcare authority, and medications which are routinely used in health care, such as bone-marrow stimulating growth factors, antibiotics, and antiemetics which should primarily be stocked and supplied by regional authorities within the regular health care framework.

Preventing uptake of selected nuclides. For preventive administration in case of internal contamination, stable iodine in the shape of potassium iodide is the classical example. This can prevent accumulation of radioactive iodine in the thyroid. Contamination with radioiodine is not a primary concern for members of the public after nuclear explosions (prophylaxis may however be indicated for responders), but is a major risk after accidents at nuclear power installations. Because of this, stable iodine is already available in all regions with NPPs, and pre-distributed to households in the immediate vicinity of the installations. Thus, no further stockpiling is necessary.

Increasing excretion of selected nuclides. *Prussian blue* (Radiogardase; ferrihexacyano ferrate) can bind caesium (Cs) and thallium (Tl) ions in the intestine, thus increasing excretion with faeces. Available as 500 mg capsules for oral intake. *DTPA* (pentetic acid) is used to de-corporate transuranics (Am, Pu, Cm, Cf, Bk) and many polyvalent cations (Ac, Ce, Cr, Co, Es, Eu, In, La, Mn, Nb, Pd, Ru, Sc, Th, Y, Zn, Zr, and Pm). DTPA forms water-soluble chelate complexes with the ions, thus increasing urine excretion. It is unsuitable for U, Np, or Cd de-corporation due to the risk of nephrotoxicity. Available as Ca-DTPA or Zn-DTPA injection solutions. *Gaviscon* (sodium alginate and Al antacids) increases excretion of Sr by substituting it for sodium which is excreted. Available as tablets and as 50 mg/ml oral suspension (recommended). *Baking soda* (sodium hydrocarbonate) alkalises urine and forms uranyl tricarbonate, thus increasing urine excretion of uranium. Available as tablets or solution for intravenous treatment.

Supportive treatments for barrier injuries and infections. These are standard parts of medical care. Prophylactic antimicrobial fluorokinolones are used, such as *Ciprofloxacin* or *Levofloxacin* (with perhaps broader action against resistant bacteria). Broad-spectrum antibiotics are used if infection is manifest. Antiviral prophylaxis is achieved with *valaciclovir*. Antifungal prophylaxis is primarily achieved with *fluconazol*, but in case of persistent neutropenia, other agents such as *posakonazol*, *isavuconazol* or *voriconazol* may be useful.

Growth stimulating factors support the haematopoietic system which is very sensitive to radiation. Granulocyte colony stimulating factors (G-CSF such as *filgrastim* (*Accofil*, *Neupogen*, *Nivestim*, *Zarzio*) or *lenograstim* (*Granocyte*) are used in haematology and oncology and are used as subcutaneous injections after whole-body exposures to radiation. Granulocyte-macrophage CSFs (GM-CSF, *sargramostim*, *Leukine*, or *molgramostim*, *Leucomax*), while not as frequently used, may also be helpful. Pegylated G-CSF (PEG-G-CSF, *pegfilgrastim*, *Fulphila*, *Neulasta*, *Pelgraz*, *Ziextenso*) acts for longer and thus requires fewer

administrations. Romiplostim (*Nplate*) can prevent or mitigate thrombocytopenia, and this is also true for eltrombopag (*Revolade*).

Soothing treatments for gastrointestinal symptoms. Loperamid (*Dimor*) reduces peristalsis and thereby reduces diarrhoea. 5-HT₃ antagonist (Ondansetron) antagonises 5-hydroxytryptamine receptors in the gastrointestinal tract and thereby is an antiemetic.

How much should be stocked? According to general regulations, sufficient amounts of medications for 1–3 months should be stocked. SREMC recommended that radiogardase and the two varieties of DTPA should be stocked at the 6 university hospitals, for 5 patients per hospital=30 patients. Growth factors should be stocked in sufficient amounts for 1000 patients (~the number of potential survivors with ARS in the 'Nynäshamn case') for 3 months.

Discussion and conclusions

Some remaining problems. The advice summarised above represents, in the authors' opinion, the current state of the art of management of ARS patients. However, research needs and MCM developments were discussed at a US NIH/NIAID workshop on GI-ARS (Winters et al., 2024) and at a yet unpublished companion 2024 workshop on vulnerable and understudied populations (where however SREMC's Valentin was an invited participant). Problems and needs are also summarised by UNSCEAR (2008) and Valentin and Stenke (2022). Based on those references, and on discussions within SREMC regarding the advice provided as mentioned above, our opinion is that the following problems should be addressed:

Research so far and planning are biased towards mass-casualty situations with uniform external whole-body exposures. Vulnerable populations and their special requirements need to be defined. Children are not just smaller adults; they need to be treated on the basis of paediatric data. Inhomogeneous exposures and varying dose rates need to be more carefully regarded. New medical countermeasures need to be developed, for the gastrointestinal subsyndrome of ARS, for skin reactions, for complex multi-organ effects, and perhaps also for paediatric patients.

Authors' contribution: Leif Stenke and Jack Valentin – conceptualisation; Christel Hedman, Marita Lagergren Lindberg, Karin Lindberg – compilation of data for the first advisory document; Christel Hedman and Marita LAGERGREN Lindberg – data compilation for the second (MCM) document; Leif Stenke – project administration and funding acquisition. All authors participated in the drafting, review, and final writing of this paper.

Acknowledgements, sources, funding. The work of SREMC is funded by the Swedish National Board of Health and Welfare. We thank our SREMC colleagues Erik Boberg, Joachim Nilsson, and Daniel Thor for reviewing an earlier draft and providing constructive comments.

References

Akleyev, A.V. (2021). Specific features of medical care provision to the population of the Techa riverside settlements. *J. Radiol. Prot.*, 41, S342–S354.

EBMT. (2017). *European Approach for the medical management of mass radiation accidents*. Pocket Guide. <https://www.ebmt.org/sites/default/files/2018-03/EBMT%20Nuclear%20Accident%20Committee%20Pocket%20Guide%202017.pdf>

FDA. (2024). *Animal Rule Information*. <https://www.fda.gov/emergency-preparedness-and-response/mcm-regulatory-science/animal-rule-information>

Goliath, M., Lidström, K., Nylén, T., & Sivertsson, S. (2021) *Kärnvapenscenario för räddningstjänst* [Nuclear weapons scenario for rescue services]. Swedish Defence Research Agency Report FOI-R--5131--SE.

ICRP. (2005). Protecting people against radiation exposure in the event of a radiological attack. ICRP Publication 96. *Ann. ICRP*, 35(1). <https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%2096>

Stewart, F.A. et al. (2012). ICRP Publication 118: ICRP Statement on Tissue Reactions / Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs – Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context. *Sage Journals*, 41(1/2). <https://doi.org/10.1016/j.icrp.2012.02.0>

Kai, M.T., Homma, J. Lochard, T., Schneider, J.F., Lecomte, A. Nisbet, S. Shinkarev, V., Averin, & Lazo, T. (2020, Dec 20). ICRP Publication 146: Radiological protection of people and the environment in the event of a large nuclear accident. *Ann. ICRP*, 49(4), 11–135. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33291942/>

MacVittie, T.J., & Farese, A.M. (2021, Nov 10). Recent advances in medical countermeasure development against acute radiation exposure based on the US FDA animal rule. *J. Radiol. Prot.*, 41(4), S438–S453. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34433144/>

Oak Ridge Institute for Science and Education. (2021). *REAC/TS RadMed App*. <https://orise.orau.gov/reacts/resources/radmed-app.html>

REMM. (2024). *Guidance on Diagnosis and Treatment for Healthcare Providers*. <https://remm.hhs.gov/index.html>

Swedish Government. (2024). *Sweden's support to Ukraine*. <https://www.government.se/government-policy/swedens-support-to-ukraine/>

UNSCEAR. (1988). *Report to the General Assembly, Scientific Annex G: Early effects in man of high doses of radiation*. https://www.unscear.org/unscear/uploads/documents/publications/UNSCEAR_1988_Annex-G.pdf

UNSCEAR. (2008). *Report to the General Assembly, Scientific Annex D: Health effects due to radiation from the Chernobyl accident*. https://www.unscear.org/unscear/uploads/documents/publications/UNSCEAR_2008_Annex-D-CORR.pdf

UNSCEAR. (2022). *2020/2021 Report to the General Assembly, Scientific Annex B: Levels and effects of radiation exposure due to the accident at the Fukushima Daiichi nuclear power station*. https://www.unscear.org/unscear/uploads/documents/publications/UNSCEAR_2020_21_Annex-B-CORR.pdf

Valentin, J., & Stenke, L. (Eds.). (2022). Special Issue Concerning Medical Management after High-Dose Radiation Exposures. *Journal Radiological Protection*. <https://iopscience.iop.org/journal/0952-4746/page/special-issue-concerning-medical-management-after-high-dose-radiation-exposures>

WHO. (2023). *National stockpiles for radiological and nuclear emergencies: policy advice*. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240067875>

Winters, T.A., Marzella, L., Molinar-Inglis, O., Price, P. W., Han, N.C., Cohen, J. E., Wang, S-J., Fotenos, A.F., Sullivan, J.M., Esker, J., Lapinskas, P.J., & DiCarlo, A.L. (2024). Gastrointestinal acute radiation syndrome: Mechanisms, models, markers, and medical countermeasures. *Radiat. Res.*, 201, 628–646.

Отримано редакцією збірника / Received: 12.09.24

Прорецензовано / Revised: 07.10.24

Схвалено до друку / Accepted: 23.10.24

Джек ВАЛЕНТАЙН¹, д-р філософії
ORCID ID: 0000-0003-3364-3355
e-mail: jack.valentin@ki.se

Крістель ХЕДМАН¹, д-р мед. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0003-4183-7598
e-mail: christel.hedman@ki.se

Маріта ЛАГЕРГРЕН ЛІНДБЕРГ¹, д-р мед. наук
ORCID ID: 0000-0002-8703-4320
e-mail: marita.lagergren@ki.se

Карін ЛІНДБЕРГ¹, д-р мед. наук
e-mail: karin.lindberg@ki.se

Лейф СТЕНКЕ¹, д-р мед. наук
ORCID ID: 0000-0002-3554-576X
e-mail: leif.stenke@ki.se

¹Каролінський інститут, Стокгольм, Швеція

МЕДИЧНА ПІДГОТОВЛЕНІСТЬ ТА ЛІКУВАННЯ ПАЦІЄНТІВ У ШВЕЦІЇ

Надано поради, що охоплюють чотири ситуації: 1) радіаційний інцидент на українській АЕС (малоймовірно, що він серйозно вплине на населення Швеції); 2) явний випадок вибуху ядерної зброї в сусідній країні (обмежений вплив на населення Швеції); 3) прохання про надання медичної допомоги у Швеції постраждалим від радіації українцям (можливий наслідок перших двох випадків); 4) вибух ядерної зброї у Швеції (катастрофічні наслідки для населення Швеції). Описано ймовірні медичні наслідки та підготовано пропозиції щодо дій медичних установ у таких випадках. Запропоновано медичні контрзаходи, до яких влада має бути готова. Надано перелік необхідних майбутніх розробок, які були б корисними для екстреної радіаційної медицини.

Ключові слова: *планування на випадок надзвичайних ситуацій, ядерні вибухи, радіаційна шкода, гострий радіаційний синдром, медичні контрзаходи.*

Автори Д. Валентайн, К. Хедман, Маріта Лагергрєн Ліндберг, К. Ліндберг та Л. Стенке заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors J. Valentin, C. Hedman, M. Lagergren Lindberg, K. Lindberg and L. Stenke declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

УДК 378.53 (477)

DOI: <https://doi.org/10.17721/3041-1491/2024.11-05>

Людмила АСЛАМОВА, канд. біол. наук, ст. наук. співроб.

ORCID ID: 0000-0003-1896-9357

e-mail: liudmyla.aslamova@knu.ua

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Людмила АНДРУШКО, канд. біол. наук

ORCID ID: 0009-0009-4489-9330

e-mail: liudmyla.andrushko@knu.ua

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Любов ШМИГЛЮК

ORCID ID: 0009-0005-7370-3916

e-mail: liubov.shmyhliuk@knu.ua

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

ПРОГАЛИНИ В ПІДГОТОВЦІ ТА ПРАЦЕВЛАШТУВАННІ МЕДИЧНИХ ФІЗИКІВ В УКРАЇНІ

Вступ. За останнє десятиріччя та попри воєнний стан існує тенденція до збільшення кількості високотехнологічного медичного обладнання для надання послуг населенню. Проте високотехнологічне інноваційне вартісне обладнання неможливо використовувати за відсутності кваліфікованих медичних фізиків та інженерів, тому існує нагальна потреба в їх підготовці та працевлаштуванні.

Методи. Проведено аналіз національних нормотворчих документів щодо діяльності медичних фізиків порівняно з міжнародними рекомендаціями із застосуванням аналітичного, порівняльного та узагальнювального методів; долучено результати власного досвіду.

Результати. Надано опис міжнародної практики з підготовки медичних фізиків, яким належить особлива відповідальність щодо забезпечення контролю та гарантії якості проведення діагностичних і терапевтичних процедур внаслідок медичного опромінення, радіаційного захисту персоналу та пацієнтів.

Висновки. Проаналізовано національні освітні навчальні програми, законодавча база щодо правового забезпечення діяльності медичного фізика, зокрема його обов'язки, сфери відповідальності порівняно з міжнародними документами. Надано опис міжнародної практики з підготовки медичних фізиків, яким належить особлива відповідальність щодо забезпечення контролю та гарантії якості під час проведення діагностичних та терапевтичних процедур при медичному опроміненні, радіаційного захисту персоналу та пацієнтів.

Ключові слова: медичний фізик, контроль якості, освітні навчальні програми, радіаційна безпека.

Вступ

За останнє десятиріччя, попри воєнний стан, спостерігається тенденція до збільшення кількості високотехнологічного медичного обладнання для надання послуг населенню загальною чисельністю близько 36 млн. За даними Державного реєстра джерел іонізуючого випромінювання та індивідуальних доз опромінення станом на серпень 2024 року в державі зареєстровано

© Асламова Людмила, Андрушко Людмила, Шмиглюк Любов, 2024

55 лінійних прискорювачів, які зберігаються або використовуються медичними закладами. Відповідно до міжнародних стандартів сучасне населення держави потребує 72 лінійних прискорювачів (високотехнологічне інноваційне вартісне обладнання, яке неможливо використовувати за відсутності кваліфікованих медичних фізиків та інженерів). Під час роботи на лінійному прискорювачі залежно від його технічної комплектації, може бути задіяно від двох до чотирьох фахівців (медичних фізиків). Задля вчасного та якісного надання медичних послуг, подолання дефіциту медичних працівників і професіоналів із вищою немедичною освітою є нагальна потреба у введенні посади медичного фізика (Кабінет Міністрів України, 2024b).

Використання новітнього устаткування потребує впровадження процедур постійного контролю та гарантії якості, кваліфікованого сертифікованого персоналу, тому саме медичного фізика залучають до діагностики та лікування, вибору, оцінювання, оптимізації медичного устаткування; забезпечення радіаційної безпеки, радіаційного захисту персоналу та пацієнтів.

Євроінтеграційний курс і членство в МАГАТЕ зобов'язує Україну здійснювати імплементацію міжнародних документів, стандартів до українського законодавства щодо діяльності у сфері використання ядерної енергії, зокрема при медичному опроміненні (Кабінет Міністрів України, 2020), незважаючи на невідповідність між національними нормативно-правовими документами у цій галузі.

Методи

Проведено аналіз національних нормотворчих документів щодо діяльності медичних фізиків порівняно з міжнародними рекомендаціями із застосуванням аналітичного, порівняльного та узагальнювального методів. У дослідженні також розглянуто результати власного досвіду.

Результати

Проаналізовано деякі компоненти освітніх програм (ОП) "Медична фізика" у трьох державних закладах вищої освіти: Київському національному університеті імені Тараса Шевченка, Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна та Прикарпатському національному університеті імені Василя Стефаника. Зазначені університети здійснюють набір абітурієнтів для здобуття ступеня магістра (бакалавра) на основі ступеня бакалавра (ОП "Медична фізика") за спеціальностями: 104 "Фізика та астрономія" (КНУ імені Тараса Шевченка); 105 "Прикладна фізика та наноматеріали" (Каразінський університет і Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника). Каразінський університет також здійснює набір на англомовну програму Educational-scientific program "Medical physics (the English language of instruction)".

Випускникам освітньої програми "Медична фізика" присвоюється кваліфікація магістр фізики та астрономії за освітньою програмою "Медична фізика" (КНУ імені Тараса Шевченка), "Магістр прикладної фізики та наноматеріалів, медична фізика" (Каразінський університет), "Бакалавр з

прикладної фізики та наноматеріалів. Фахівець з медичної фізики" (Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника).

Проте після отримання дипломів магістра (бакалавра) із зазначеною кваліфікацією випускники українських університетів не можуть працювати як медичні фізики в медичних закладах. Спробуємо розібратися, чому так відбувається.

1. Освітня складова. На жаль, жодну освітню програму "Медична фізика" в університетах держави не викладають на спеціалізованих кафедрах медичної фізики, які мали б максимальні можливості для ефективної підготовки висококваліфікованих фахівців відповідно до європейських стандартів. Як наслідок, не охоплено фахові теоретичні курси "Взаємодія іонізуючого випромінювання з речовиною", "Дозиметрія", "Дія іонізуючого випромінювання на організм", "Ядерна фізика" тощо, без яких неможливо якісно теоретично та практично опанувати складні наукоємні методи лікування та діагностики. Бажано, щоб заклади вищої освіти у процесі формування національних освітніх навчальних програм дотримувалися варіабельності, що забезпечить можливість випускникам (магістрам) у подальшому працювати не тільки в різних галузях медичної фізики, але й в освітніх закладах, науково-дослідних установах.

Європейські університети у процесі підготовки медичного фізика враховують певні вимоги до освіти: 1) майбутній фахівець має отримати базову освіту з фізики та математики; 2) фахівець має опанувати обов'язкові знання з базових медичних дисциплін: анатомії, фізіології, біохімії тощо. Таким чином, освіта має проходити в два етапи. Спочатку студент набуває ступінь бакалавра із фізики, а далі – ступінь магістра з медичної фізики. Тобто у класичних немедичних університетах держав Європейського Союзу медичні фізики після трьох років навчання на бакалавраті з фізики та двох років навчання в магістратурі з медичної фізики на спеціалізованих кафедрах отримують повну вищу освіту та диплом магістра зі спеціальності (спеціалізації) "Медична фізика" (Вугне, 2023). Три найкращі університети Європи, які мають магістратуру та проводять підготовку фахівців із медичної фізики, це: University College London, Heidelberg University – Germany, Imperial College London (за даними незалежного рейтингу EduRank, станом на 29.02.24) (EduRank, 2024).

2. Клінічна практика. На жаль, жоден український університет не спроможний забезпечити магістрів / бакалаврів, які опановують освітню програму "Медична фізика", можливістю проходження клінічної практики в клініках із сучасним устаткуванням, на кшталт високоенергетичних лінійних прискорювачів тощо.

В Європі загальною практикою є поєднання клінічних установ і закладів вищої освіти, що дає змогу на високому рівні проводити підготовку фахівців та отримувати практичний досвід у процесі впровадження новітніх технологій. Зокрема, у шведській Каролінській клініці, яка є однією з найбільших

університетських лікарень у Європі, налагоджено активну співпрацю зі Стокгольмським університетом, де навчаються майбутні спеціалісти, зокрема всі студенти спеціальності "Медична фізика" проходять обов'язкову практику на базі клініки. Майбутні медичні фізики з Каунаського технологічного університету в Литві мають можливість проходження клінічної практики в Центрі радіаційної терапії, де працюють радіаційні онкологи, медичні фізики, радіаційні технологи тощо.

Отже, медичні фізики-практики, які працюють в європейських клініках та інших медичних центрах, можуть бути науковими та педагогічними співробітниками в навчальних закладах (Pfeiffer et al., 2021). Критерії, що сприяють відповідності освіти клінічній практиці для медичних фізиків, визнанню професії, викладені в багатьох публікаціях.

Інформація з організації освітнього процесу та клінічної практики для майбутніх медичних фізиків у Швеції та Литві отримана одним з авторів завдяки участі у проєкті "Quality Assurance and Quality Control in Medical Radiology (phase 1), Improvement of Quality Assurance and Quality Control in Medical Radiology (phase 2)", що запропонований шведським регулятором Swedish radiation safety authority (SSM).

3. Працевлаштування. Основна сфера діяльності медичного фізика пов'язана із застосуванням ядерної енергії в медицині, але до його компетенції також належить робота з обладнанням, яке не використовує опромінення. Станом на сьогодні Україна, вкладаючи кошти в навчання та підготовку цих фахівців, не надає їм можливості працювати в медичних закладах через відсутність у штатному розкладі посади "Медичний фізик", оскільки:

- у Національному класифікаторі ДК 003:2010 "Класифікатор професій" (КП) відсутня посада "Медичний фізик" або "Фахівець з медичної фізики" у галузі "Охорона здоров'я" (Національний класифікатор України, 2024);
- п. 32 національних Ліцензійних умов провадження господарської діяльності з медичної практики забороняє введення посад спеціальностей фахівців із вищою немедичною освітою, які планують працювати в системі охорони здоров'я України (Кабінет Міністрів України, 2024а);
- технічні спеціальності не зазначено в Номенклатурі спеціальностей фахівців з вищою немедичною освітою, які планують працювати в системі охорони здоров'я, тому ці фахівці не можуть виконувати роботи, що пов'язані з медичною фізикою (Міністерство охорони здоров'я України, 2023).

Відповідно до вимог КП надаємо перелік робіт, що можуть виконувати медичні фізики (табл. 1).

Нормативно-правові акти (НПА) різної юридичної сили та часу прийняття містять правові невідповідності щодо дозволу медичної практики для фахівців із вищою немедичною освітою, зокрема медичним фізикам: у зазначених документах зафіксовано заборону введення в систему охорони здоров'я України посад фахівців з вищою немедичною освітою (Кабінет Міністрів України 2024а; Міністерство охорони здоров'я України, 2023). Автори і раніше

звертали увагу на те, що в національних НПА є назви робіт та функціональні обов'язки, у яких зустрічаються словосполучення "Медична фізика" та "Медичний фізик" (Асламова, Куліч, & Шмиглюк, 2021), наприклад:

- спільний наказ Держатомрегулювання та МОЗ України 16.02.2017 р. № 51/151 (Державна інспекція ядерного регулювання України, Міністерство охорони здоров'я України, 2017): не визначено термін "Медичний фізик" та не зазначено його функціональні обов'язки, проте на нього та інженера-радіолога покладено відповідальність за радіаційну безпеку в установі;

- наказ Держатомрегулювання від 03.10.2008 р. № 166 (Державна інспекція ядерного регулювання України, 2008): не надано інформації щодо фахівців з медичної фізики.

Таблиця 1

Показник фахових назв робіт, що можуть виконувати медичні фізики

Код КП	Назва, що відповідає КП	Професійна назва робіт
2111.1	Наукові співробітники (фізика, астрономія)	Молодший науковий співробітник (медична фізика)
2111.1		Науковий співробітник (медична фізика)
2111.1		Науковий співробітник-консультант (медична фізика)
2111.2	Фізики та астрономи	Фахівець з медичної фізики
3111	Лаборанти та техніки, пов'язані з хімічними та фізичними дослідженнями	Фахівець з медичної фізики
3133	Оператори медичного устаткування	Оператор медичного устаткування
7311	Виробники та ремонтники прецизійних інструментів і приладів	Електромеханік з ремонту та обслуговування електронної медичної апаратури
7311		Електромеханік з ремонту та обслуговування медичних оптичних приладів
7311		Електромеханік з ремонту та обслуговування медичного рентгенівського устаткування
7311		Електромеханік з ремонту та обслуговування медичного устаткування
7311		Контролер медичного устаткування та виробів
7311		Оптик медичний
7319	Укрупнені професії робітників, що виконують високоточні роботи з металу та подібних матеріалів	Електромеханік з ремонту та обслуговування медичного устаткування та апаратури

Проте в жодному НПА не прописано визначення терміна, функціональні обов'язки та сферу відповідальності медичного фізика, також він не ввійшов до списку обов'язкових фахівців, які мають забезпечувати якісну роботу сучасного медичного закладу під час надання послуг з використанням медичного опромінення. Маємо правові колізії, тому для вирішення низки важливих питань саме інженери-радіологи разом із лікарями-радіологами, окрім своїх прямих обов'язків (Кабінет Міністрів України, 2024а; Міністерство охорони здоров'я України, 2023) виконують деякі функції медичних фізиків, обов'язки відповідальних за радіаційну безпеку в установі. На думку авторів, ця ситуація є наслідком:

- відсутності в національних НПА вимог до медичних фізиків, змісту та завдань їхньої діяльності;
- недостатньої гармонізації української законодавчо-нормативної бази з міжнародними документами щодо забезпечення радіаційного захисту пацієнтів і персоналу в процесі поводження з джерелами іонізуючого випромінювання;
- відсутності державного оцінювання потреб у підготовці національних медичних фізиків;
- відсутності в номенклатурі МОЗ України відповідних спеціальностей і посад.

Зважаючи на актуальність розвитку медичної фізики у світі, запровадження новітніх радіаційних технологій і підготовку національних сучасних фахівців з медичної фізики, Навчально-науковий центр радіаційної безпеки КНУ імені Тараса Шевченка разом із Всеукраїнським об'єднанням медичних фізиків та інженерів з 2011 року започаткували щорічне проведення міжнародних конференцій "Медична фізика – сучасний стан, проблеми, шляхи розвитку. Новітні технології". Міжнародні та національні наукові дослідження, які стали основою для презентацій і статей, надають нового поштовху для розвитку наукоємної, важливої науки – медична фізика.

Уряд України, схваливши в 2024 р. Національну стратегію контролю злоякісних новоутворень на період до 2030 року, визнав наявність дефіциту медичних працівників і професіоналів із вищою немедичною освітою, які забезпечують надання якісних медичних послуг пацієнтам (Кабінет Міністрів України, 2024b).

На виконання завдання п. 13 плану дій з реалізації на період до 2025 року Національної стратегії Міністерству охорони здоров'я України доручено у термін до I кварталу 2025 року розробити та затвердити кваліфікаційну характеристику професії "Професіонал з медичної фізики"; внести відповідні зміни до Довідника кваліфікаційних характеристик професій працівників (вип. 78 "Охорона здоров'я") щодо введення посади "Професіонал з медичної фізики" до Переліку посад професіоналів з вищою немедичною освітою, які працюють у системі охорони здоров'я; внести зміни до переліку посад професіоналів у сфері охорони здоров'я. Проте введення цієї професії суперечитиме вимогам спільного Наказу Держатомрегулювання та МОЗ України 16.02.2017 р. № 51/151.

Дискусія і висновки

Зважаючи на викладене, з метою врахування багаторічного досвіду, що отриманий у процесі навчання та підготовки медичних фізиків, запропоновано:

- сформуувати спільне звернення закладів вищої освіти (які мають освітні програми з медичної фізики) за підтримки МОН України до МОЗ України щодо долучення фахівців зазначених ЗВО до розроблення кваліфікаційної характеристики професії "Професіонал з медичної фізики" та його функціональних обов'язків;

- внести зміни до спільного наказу Держатомрегулювання та МОЗ України від 16.02.2017 № 51/151 "Про затвердження Загальних правил радіаційної безпеки використання джерел іонізуючого випромінювання у медицині" та доповнити вживані терміни визначенням терміна "Професіонал з медичної фізики", зазначивши його функціональні обов'язки.

Внесок авторів: Людмила Асламова – концептуалізація, методологія, написання – оригінальна чернетка; Людмила Андрушко – формальний аналіз, валідація даних; Любош Шмиглюк – редактування.

Список використаних джерел

Асламова, Л. І., Куліч, Є. В., & Шмиглюк, Л. В. (2021). Необхідність впровадження сертифікації медичних фізиків в Україні. *Ядерна фізика та енергетика*, 22, 206–212. <https://doi.org/10.15407/jnpae2021.02.206>

Державна інспекція ядерного регулювання України. (2008). *Про затвердження Вимог до системи управління якістю проведення діагностичних та терапевтичних процедур з використанням джерел іонізуючого випромінювання* (наказ від 03.10.2008 № 166, ред. від 03.10.08). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1054-08#Text>

Державна інспекція ядерного регулювання України, Міністерство охорони здоров'я України. (2017). *Про затвердження Загальних правил радіаційної безпеки використання джерел іонізуючого випромінювання у медицині* (наказ від 16.02.2017 р. № 51/151, ред. від 16.02.17). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0636-17#Text>

Державний комітет України з питань технічного регулювання та споживчої політики. (2024). *Національний класифікатор України. Класифікатор професій ДК 003:2010* (наказ від 28.07.2010 р. № 327, ред. від 16.01.24). <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va327609-10#Text>

Кабінет Міністрів України. (2020). *Про виконання Угоди про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони* (постанова від 25.10.2017 р. № 1106, ред. від 18.09.20). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1106-2017-%D0%BF#Text>

Кабінет Міністрів України. (2024а). *Про затвердження Ліцензійних умов провадження господарської діяльності з медичної практики* (постанова від 02.03.2016 р. № 285, ред. від 15.07.24). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/285-2016-%D0%BF#Text>

Кабінет Міністрів України. (2024б). *Національна стратегія контролю злоякісних новоутворень на період до 2030 року* (розпорядження від 02.08.2024 р. № 730-р.). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/730-2024-%D1%80#Text>

Міністерство охорони здоров'я України. (2023). *Про атестацію професіоналів з вищою немедичною освітою, які працюють в системі охорони здоров'я* (наказ від 12.08.2009 р. № 588, ред. від 17.22.23). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0895-09#Text>

Byrne, B., Marcu, L., Mazzoni, L.N., & Caruana, C.J. (2023). EFOMP Malaga Declaration. An updated vision on Medical Physics in Europe. *Physica Medica*, 111, 102620. 1–3. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2023.102620>

EduRank. (2024, February 29). *Best Universities for Medical Physics in Europe*. <https://edurank.org/physics/medical/eu/>

Pfeiffer, D., Al-Hallaq, H., & Halvorsen, P.H. et al. (2021). AAPM Medical Physics Practice Guideline 3.b: Levels of supervision for medical physicists in clinical training. *J. Appl. Clin. Med. Phys.*, 22(6), 11–15. <https://doi.org/10.1002/acm2.13258>

References

Aslamova L.I., Kulich Ie. V., & Shmyhliuk L.V. (2021). The necessity of implementation of medical physicists' certification in Ukraine. *Yaderna fizyka ta enerhetyka Nucl. Phys. At. Energy*, 22, 206–212 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/jnpae2021.02.206>

EduRank. (2024, February 29). *Best Universities for Medical Physics in Europe*. <https://edurank.org/physics/medical/eu/>

Byrne, B., Marcu, L., Mazzoni, L.N., & Caruana, C.J. (2023). EFOMP Malaga Declaration. An updated vision on Medical Physics in Europe. *Physica Medica*, 111, 102620. 1–3. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2023.102620>

Ministry of Health of Ukraine. (2023). *About the certification of professionals with higher non-medical education who work in the health care system* (Order dated August 12, 2009, No. 588, Rev. dated 22.17.23) [in Ukrainian]. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0895-09#Text>

State Nuclear Regulation Inspection of Ukraine, Ministry of Health of Ukraine. (2017). *On the approval of the General Rules of Radiation Safety for the Use of Ionizing Radiation Sources in Medicine* (order dated February 16, 2017 No. 51/151, Rev. dated February 16, 2017) [in Ukrainian]. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0636-17#Text>

State Inspection of Nuclear Regulation of Ukraine. (2008). *On the approval of Requirements for the quality management system of diagnostic and therapeutic procedures using sources of ionizing radiation* (Order No. 166 dated 03.10.2008, Rev. dated 03.10.08) [in Ukrainian]. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1054-08#Text>

State Committee of Ukraine on Technical Regulation and Consumer Policy. (2024). *National Classifier of Ukraine. Classifier of professions DK 003:2010* (order dated 07/28/2010 No. 327, revised 01/16/24) [in Ukrainian]. <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va327609-10#Text>

Pfeiffer, D., Al-Hallaq, H., & Halvorsen, P.H. et al. (2021). AAPM Medical Physics Practice Guideline 3.b: Levels of supervision for medical physicists in clinical training. *J. Appl. Clin. Med. Phys.*, 22(6), 11–15. <https://doi.org/10.1002/acm2.13258>

Cabinet of Ministers of Ukraine. (2020). *On the implementation of the Association Agreement between Ukraine, on the one hand, and the European Union, the European Atomic Energy Community and their member states, on the other hand* (Resolution dated 10/25/2017 No. 1106, revised 09/18/20) [in Ukrainian]. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1106-2017-%D0%BF#Text>

Cabinet of Ministers of Ukraine. (2024a). *On the approval of the Licensing conditions for the conduct of business activities in medical practice* (Resolution dated March 2, 2016, No. 285, Rev. dated July 15, 2016) [in Ukrainian]. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/285-2016-%D0%BF#Text>

Cabinet of Ministers of Ukraine. (2024b). *National strategy for the control of malignant neoplasms for the period up to 2030* (order dated August 2, 2024 No. 730-p) [in Ukrainian]. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/730-2024-%D1%80#Text>

Отримано редакцією збірника / Received: 01.09.24

Прорецензовано / Revised: 13.09.24

Схвалено до друку / Accepted: 01.10.24

Liudmyla ASLAMOVA, PhD (Biol.), Senior Research
ORCID ID: 0000-0003-1896-9357
e-mail: liudmyla.aslamova@knu.ua
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine

Liudmyla ANDRUSHKO, PhD (Biol.)
ORCID ID: 0009-0009-4489-9330
e-mail: liudmyla.andrushko@knu.ua
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine

Liubov SHMYHLIUK
ORCID ID: 0009-0005-7370-3916
e-mail: liubov.shmyhliuk@knu.ua
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine

MEDICAL PHYSICIST EDUCATION AND EMPLOYMENT GAPS IN UKRAINE

I n t r o d u c t i o n . *Over the past decade and despite the martial law, there is a tendency to increase the number of high-tech medical equipment to provide services to the population, however, high-tech innovative valuable equipment cannot be used in the absence of qualified medical physicists and engineers, so there is an urgent need for their training and employment.*

M e t h o d s . *An analysis of national normative documents on the activities of medical physicists was carried out in comparison with international recommendations using analytical, comparative and generalizing methods; the results of my own experience are attached.*

R e s u l t s . *A description of the international practice of training medical physicists, who have a special responsibility for ensuring control and quality assurance of diagnostic and therapeutic procedures during medical radiation, radiation protection of personnel and patients, is provided.*

C o n c l u s i o n s . *The authors analyse national educational curriculums and legislation on the legal support of medical physicist activities in the article. In particular, their duties and areas of responsibility are compared to international documents. International practices on medical physicist training are presented as for a specialist who takes special responsibility for the performance of control and quality assurance during diagnostics and therapy procedures with medical exposure and radiation protection of personnel and patients.*

K e y w o r d s : *medical physicist, quality control, education curriculums, radiation safety.*

Головний редактор Л. Асламова, член програмного комітету Л. Шмиглюк, член організаційного комітету Л. Андрушко заявляють про відсутність конфлікту інтересів та невтручання в процес оцінювання цієї статті відповідно до міжнародних стандартів публікаційної етики. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The Editor-in-Chief L. Aslamova, a member of the Program committee L. Shmyhliuk, a member of the Organizing committee L. Andrushko declare the absence of a conflict of interest and has not interfered in the evaluation process of this article, in accordance with international publication ethics standards. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

UDC 621.039.586; 014

DOI: <https://doi.org/10.17721/3041-1491/2024.11-06>

Lyubomyr NYKYRUY¹, PhD (Phys. & Math.), Prof.

ORCID ID: 0000-0002-3754-0348

e-mail: lyubomyr.nykyruiy@pnu.edu.ua

Daria KHOMA¹, PhD Student

ORCID ID: 0009-0001-3339-4515

e-mail: dariia.khoma.21@pnu.edu.ua

Sergiy FEDOSOV², DSc (Phys. & Math.), Prof.

ORCID ID: 0000-0003-3457-8911

e-mail: Fedosov.Serhiy@gmail.com

Mirosław ŁABUZ³, PhD

Scopus ID: 9247772300

ORCID ID: 0000-0002-3742-470X

e-mail: mlabuz@ur.edu.pl

Krzysztof KUCAB³, PhD (Phys. & Math.), Prof.

ORCID ID: 0000-0001-6157-3775

e-mail: kkucab@ur.edu.pl

¹Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Ivano-Frankivsk, Ukraine

²Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

³Rzeszow University, Rzeszow, Poland

MEDICAL PHYSICS EDUCATION: SELECTED CHALLENGES FOR UKRAINE

The training of specialists in medical physics, which is based on the combination of medicine and physics, has already developed stability in the world community. This is a new direction for Ukraine that requires standardization and harmonization with existing international practices. In the paper the analyzes of the publications of scientists in a combination of the tags "medical physics" and "education" with the aim of finding patterns regarding the support and development of the considered field throughout the world and in Ukraine. The peculiarities of international cooperation are considered, the circle of leading publications in scientific fields is outlined, and the factors influencing the institutions of different countries on the development of medical physics are analysed. The study is based on the results of data published in the international scientometric database Scopus. An overview analysis of some key approaches used in the universities of Ukraine and Poland in the development of this direction was carried out, and recommendations for Ukrainian specialists were formulated on their basis.

Keywords: *medical physics, education, publications, Scopus, partnership in education for sustainable development.*

Introduction

The problem of training of the high-level specialists who can effectively apply the latest achievements of physics in medicine has its own history with features that depend on various factors, such as an economic capabilities of countries, on the needs of the market and the region, on the development of the scientific and technical progress of humanity as a whole. Now, the Qualification Framework for an expert in

medical physics in the EU is defined in the European Commission Radiation Protection report No. 174 "European Guidelines on Medical Physics Expert" (European Commission, 2014). Similarly, standards of this type were previously developed in the U.S. Therefore, today medical physicist is a prestigious and necessary profession in most countries. However, for Ukraine, such direction has not yet been finally verified. Therefore, the research of this problem and the development of effective proposals aimed at helping Ukrainian universities to implement and make successful among applicants an educational program for the training of medical physicists are urgent.

The methodological development of the educational component for the training of medical physicists is high-important. Many papers in specialized peer-reviewed journals are devoted to this problem. It is based on such works that the authors of this study draw conclusions about trends in the world and in Ukraine. The research methodology is based on the analysis of publications according to the data of the scientific and metric database Scopus (www.scopus.com; Wisz et al., 2018). This approach has been tested for training students of applied physics (Nykyruiy et al., 2021; 2022). For the analysis, the authors set the tags "medical physics" and "education" in the search simultaneously. The search was carried out by title, keywords and abstracts: TITLE-ABS-KEY ("medical physics") AND TITLE-ABS-KEY (education). The Scopus database was chosen due the high standards of publications and the international dissemination of research. So, as of July 1, 2024, the 2,048 publications were published for the specified search query. In addition, the most cited papers were analysed separately, which made it possible to form conclusions about the trends generally accepted in the professional society, about their development, and the latest papers from various publications were also analysed, which allowed to highlight the latest trends in the development of the field this research. At the same time, the authors of the study rejected materials that are not related to the training programs of specialists in the field of medical physics. Also, on certain aspects, the authors of this work make a comparative analysis of the publications of researchers from Poland and Ukraine. This choice is determined primarily by the fact that the countries border each other and have a lot in general in cultural or communication aspects. And, the most important thing is that Poland is a member of the EU, and Ukraine is applying for membership, which requires standardization in many areas with the EU, including the development and implementation of medical physics.

Based on the results of the analysis of the combination of selected tags, 2,048 documents were recorded in the Scopus database. h-index of the studied group of publications was $h = 58$, which is a high indicator for such a number of published materials and indicates the relevance of this direction.

In historical perspective, the first publications date back to 1931, but the first papers with justification of the training process of medical physicists date back to 1947 (Schmitt, 1947) and 1948 (Stead, 1948). Unfortunately, the full text are not available online, nor are the abstracts (including the original journal's web and the

Scopus database). However, the main direction, which today is decisive for the development of medical physics, is indicated as the importance of training specialists in the field of radiology in medicine.

Based on the results of the published papers, a brief historical description of the development of this area was made based on the search results (www.scopus.com). After the discovery and explanation of new physical phenomena, researchers actively tried to find their application in various applied fields, especially in medicine. Accordingly, the development of the first methodical materials were reasonably aimed at improving the knowledge of the doctors themselves in related fields, such as physics, biology, biochemistry, etc. Even the first article purely on the importance of studying medical physics was aimed at medical students (Rauser, 1954).

A special starting point for the development of medical physics in the 1950s and 1960s was the achievements in radiation therapy and nuclear medicine. And already in 1958, the American Association of Medical Physicists (AAPM) was founded, and American universities began to offer separate courses related to medical physics.

Education programs in medical physics began to appear at leading universities in the United States, Canada, and Europe in the 1970s. And in the 1980s, Master's programs in medical physics were opened in Great Britain and Germany. In the 1990s, such programs began to emerge in Asia and Australia, prompting a demand for standardization and accreditation of educational programs and harmonization of curricula. And since the 2000s, this problem has acquired a large-scale character, which caused a real surge in publishing activity on the subject (Fig. 1). Various international organizations have begun to provide accreditation for such programs based on developed methods. One of the most well-known is the Commission on Accreditation of Educational Programs in Medical Physics (CAMPEP) (<https://www.campep.org/>).

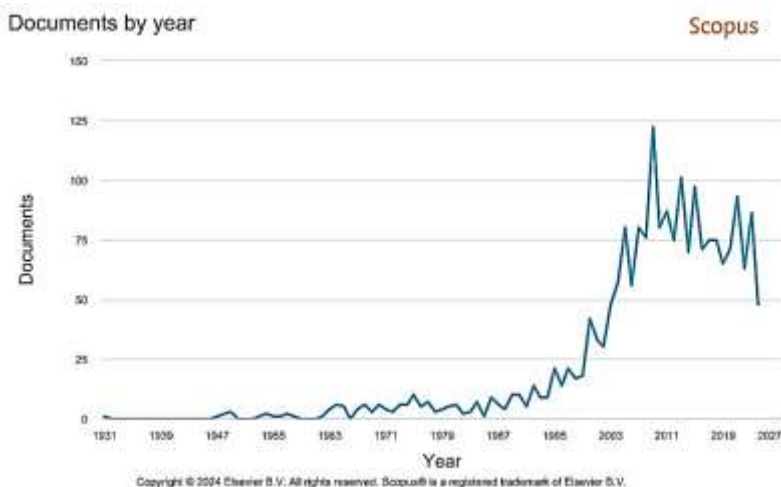


Fig. 1. Dynamics of publication activity in the field of "Medical Physics" over the years

And since the 2010s, such programs have experienced new challenges associated with an emphasis on interdisciplinarity, including additionally engineering, computer science, and biology (Starkschall, Beckham, & Hendee, 2013). At this time, a significant number of review materials have been published, which demonstrate various stages of the development of medical physics throughout the world, as well as features that are characteristic of individual countries. For example, review articles (Shen et al., 2020; Fiorino et al., 2020; Kurz et al., 2020; Podgoršak, 2006), although there are much more of them.

Let's consider the main trends regarding the scientific justification of the development of the educational component of medical physics. As indicated above, the pioneers in the development of medical physics were the universities of the USA, which have remained in the leading positions even today (Table 1). However, if they are unequivocal leaders in terms of the number of papers, then the citations level (right column) shows that universities in Europe, Canada and China competitively offer their current approaches.

Table 1

**List of the most cited and institutions and those that published
the largest number of scientific and methodological materials dedicated
to medical physics**

Leading institutions (most publications)	The most cited scientific centers
University of Texas MD Anderson Cancer Center, U.S.	Harvard Medical School, Boston, MA, U.S.
Harvard Medical School, U.S.	Institute of Cancer Research, Royal Marsden NHS Foundation Trust, UK
University of Washington, U.S.	McGill University, Montreal General Hospital, Canada
University of Wisconsin-Madison, U.S.	University Medical Centre Maastricht, Netherlands
University of Michigan, U.S.	University of Macau, China
Mayo Clinic, U.S.	University of Illinois, U.S.
International Atomic Energy Agency, Austria	University of Texas Health Sciences Center, U.S.
Massachusetts General Hospital, U.S.	Pennsylvania State University College of Medicine, MS Hershey Medical Center, U.S.
Medical College of Wisconsin, U.S.	Mayo Clinic, U.S.
University of Washington School of Medicine, U.S.	University of Southern California, U.S.

Another aspect worth analysing and from which conclusions can be drawn concerns the scientific journals in which research is published on the subject under consideration (Table 2). Unequivocal leaders are specialized journals in medical physics, which have a good CiteScore indicator. Moreover, it is worth noting that scientific publications of this level (table 2, positions 1–8) are undoubtedly available

for the publication of results of a high scientific level, which are obtained by researchers from Ukraine or Poland. Positions 9 and 10 are top journals, indicating a clear recognition of the need for this type of research for the global community. Thus, Nature and Science Journal's publish generalized new materials that were previously studied by powerful scientific groups in large international scientific centres and research consortia. Such published results shape the directions of human development.

Table 2

The list of the most cited scientific publications in the scientific community regarding the development of the methodology of training medical physicists

Journal title	CiteScore 2023
Medical Physics	6.8
Ifmbe Proceedings	1.0
Health Physics	4.2
Physica Medica	6.8
Journal of Applied Clinical Medical Physics	3.6
International Journal of Radiation Oncology Biology Physics	11.0
Journal of the American College of Radiology	6.3
Australasian Physical and Engineering Sciences in Medicine	2.0
Nature	90.0
Science	61.1

Fig. 2 demonstrates the interdisciplinary nature of the training of medical physicists. Moreover, in our case, it is not only medicine and physics, but also a set of areas such as biochemistry, engineering, IT, etc. This paper does not address the new and promising current aspect of interdisciplinary research related to AI. But, according to new publications with high citations, it is AI that will significantly expand the development of interdisciplinary research in medical physics in the coming years (Xu et al., 2021; Thompson et al., 2018).

Now we will very briefly consider the most general publications in which specialists from Poland and Ukraine publish their research works on the development of medical physics (Table 3).

The analysis of Table 3 shows that successful papers of university scientists from Poland are published in Journals that are rated significantly higher than the world average (Table 2). Most of these publications focus on radiation oncology. And this direction fully meets the European standards for specialists in medical physics "Medical Physics Expert". The top publications for Ukrainian researchers, as can be seen from the same table, is the Ukrainian Physical Journal (UPJ), which is primarily focused on research in physics. Among the international editions, conference Proceedings are the top ones, moreover, most of the conferences took place in Ukraine, although they had international status. On the one hand, UPJ is an open access journal, however, the world community of medical physicists is more focused on highly specialized publications (Table 2), which makes the ideas or proposals of Ukrainian scientists, although open, but little known to the world community.

Documents by subject area

Scopus

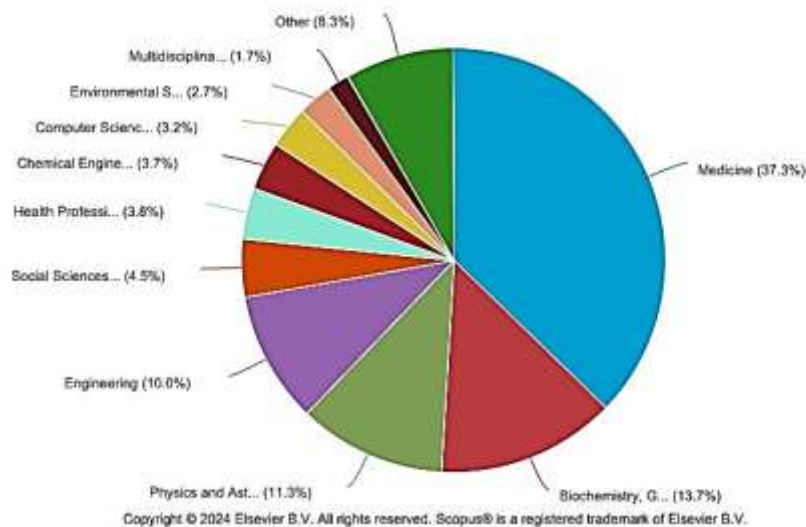


Fig. 2. The subject area of research on methodology for the training of medical physicists

Table 3

The most cited Journals in which scientists from Poland (left column) and Ukraine (right column) publish their research on the development of the educational component

Poland		Ukraine	
Journal	CiteScore 2023	Journal	CiteScore 2023
Journal of Translational Medicine	10.0	Ukrainian Journal of Physics	1.2
Radiotherapy and Oncology	10.3	2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology, Conference Proceedings	n/a
European Journal of Cancer	11.5	Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering	0.5

Therefore, one of the proposals for increasing the "visibility" of Ukrainian publications in the world, and therefore increasing their perception, is the need for national standardization of the direction and harmonization with standards already accepted in the world's one. In addition, the direction of internationalization of such developments is important for Ukraine. Joint publications will allow (1) to bring closer the decision regarding the standardization of the training program for medical physicists, and (2) to expand research opportunities due to the joint use of the material bases of each institution of such an international consortium. Therefore, one

of the solutions may be the beginning of the development and approval of joint educational programs in the field of "Medical Physics".

Discussion and conclusions

The publication of current results in purely "physical" or national journals does not contribute to the high rate of progress of medical physics in Ukraine. Instead, narrow-profile international publications, which are known to the world community in the field of medical physics, effectively contribute to the exchange of knowledge, experience and the creation of active partnerships.

The development of joint educational programs is an important direction for the development of medical physics in Ukraine. In particular, promising partners of such joint programs could be partner universities in Poland (geographical and cultural proximity), U.S. (pioneers of the development of medical physics).

Authors' contribution: Lyubomyr Nykyruy – conceptualization, methodology; Daria Khoma – data collection, formal analysis; Serhiy Fedosov – selection and data validation; Mirosław Łabuz – data analysis, writing – revision and editing; Krzysztof Kucab – data validation, editing.

References

- European Commission. (2014). *Radiation Protection N°174. European Guidelines on Medical Physics Expert*. N 1681-6803 MJ-AX-14-002-EN-C. <https://www.efomp.org/uploads/bce2357b-f334-4c09-95f9-928ee917b719/174.pdf>
- Fiorino, C., Jeraj, R., Clark, C. H., Garibaldi, C., Georg, D., Muren, L., ... & Jornet, N. (2020). Grand challenges for medical physics in radiation oncology. *Radiotherapy and Oncology*, 153, 7–14.
- Kurz, C., Buizza, G., Landry, G., Kamp, F., Rabe, M., Paganelli, C., ... & Riboldi, M. (2020). Medical physics challenges in clinical MR-guided radiotherapy. *Radiation Oncology*, 15, 1–16.
- Nykyruy, L. I., Fedosov, S. A., Yaremiy, I. P., Zamuruyeva, O. V., Tymoshchuk, A. B., & Fedosov, V. S. (2021). Applied research areas of modern physics: medical and computer physics. *Scientific Notes*, 72, 36–44.
- Nykyruy, L. I., Yaremiy, I. P., Zamuruyeva, O. V., Tymoshchuk, A. B., & Fedosov, S. A. (2022). *Applied areas of medical physics research. In Current problems of chemistry, materials science and ecology*. Lesya Ukrainka Volyn National University.
- Podgoršak, E. B. (2006). *Radiation physics for medical physicists*. Springer.
- Rausser, V. (1954). Teaching of medical physics. *Casopis Lekarů Ceských*, 93(47), 1308–1309.
- Schmitt, F. (1947). The growing importance of physics in the premedical and medical curriculums. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 28(2), 71–75.
- Shen, C., Nguyen, D., Zhou, Z., Jiang, S. B., Dong, B., & Jia, X. (2020). An introduction to deep learning in medical physics: advantages, potential, and challenges. *Physics in Medicine & Biology*, 65(5), 05TR01.
- Starkschall, G., Beckham, W., & Hendee, W. R. (2013). Accreditation of medical physics educational programs in North America. *Med. Phys. Int*, 1, 22–26.
- Stead, G. (1948). The place of physics in the training of the medical radiologist. *The British Journal of Radiology*, 21(248), 373–379.
- Thompson, R. F., Valdes, G., Fuller, C. D., Carpenter, C. M., Morin, O., Aneja, S., ... & Thomas Jr, C. R. (2018). Artificial intelligence in radiation oncology: a specialty-wide disruptive transformation? *Radiotherapy and Oncology*, 129(3), 421–426.
- Wisz, G., Nykyruy, L., Yakubiv, V., Hryhoruk, I., & Yavorskyi, R. (2018). Impact of advanced research on development of renewable energy policy: case of Ukraine. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 8(4), 2367–2384.
- Xu, Y., Liu, X., Cao, X., Huang, C., Liu, E., Qian, S., ... & Zhang, J. (2021). Artificial intelligence: A powerful paradigm for scientific research. *The Innovation*, 2(4), 100179.

Отримано редакцію збірника / Received: 03.09.24

Прорецензовано / Revised: 20.09.24

Схвалено до друку / Accepted: 23.10.24

Любомир НИКИРУЙ¹, канд. фіз.-мат. наук, проф.

ORCID ID: 0000-0002-3754-0348

e-mail: lyubomyr.nykyruy@pnu.edu.ua

Дарія ХОМА¹, асп.

ORCID ID: 0009-0001-3339-4515

e-mail: dariia.khoma.21@pnu.edu.ua

Сергій ФЕДОСОВ², д-р фіз.-мат. наук, проф.

ORCID ID: 0000-0003-3457-8911

e-mail: Fedosov.Serhiy@gmail.com

Мірослав ЛАБУЗ³, д-р філософії

Scopus ID: 9247772300

ORCID ID: 0000-0002-3742-470X

e-mail: mlabuz@ur.edu.pl

Жешувський університет, Жешув, Польща

Кшиштоф КУЦАБ³, канд. фіз.-мат. наук, проф.

ORCID ID: 0000-0001-6157-3775

e-mail: kkucab@ur.edu.pl

¹Прикарпатський національний університет

імені Василя Стефаника, Івано-Франківськ, Україна

²Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

³Жешувський університет, Жешув, Польща

МЕДИЧНА ФІЗИКА В УНІВЕРСИТЕТСЬКИХ ПРОГРАМАХ: ВИКЛИКИ ДЛЯ УКРАЇНИ

Освітня програма "Медична фізика", яка виникла на поєднанні медицини та фізики, уже має вироблену сталість у світовому співтоваристві. Для України – це новий напрям, який потребує стандартизації та гармонізації із наявними міжнародними практиками. У статті проаналізовано публікації вчених за напрямом "Медична фізика" з метою знайти закономірності з підтримки та розвитку цього напрямку у світі та в Україні. Розглянуто особливості міжнародної співпраці, окреслено коло провідних видань у наукових сферах, проаналізовано фактори впливовості інституцій різних країн на розвиток медичної фізики. Дослідження базується на результатах даних, що опубліковані у міжнародній наукометричній базі Scopus. Виконано короткий аналіз деяких ключових факторів, які суттєво впливають на розвиток медичної фізики, на прикладі України та Польщі. На основі цього аналізу сформульовано рекомендації для українських фахівців.

Ключові слова: медична фізика, освіта, публікації, Scopus, партнерство в освіті для сталого розвитку.

Автори Д. Хома, С. Федосов, М. Лабуз та К. Куцаб заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Член організаційного комітету Л. Никуруй, заявляє про відсутність конфлікту інтересів та невтручання в процес оцінювання цієї статті відповідно до міжнародних стандартів публікаційної етики. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors D. Khoma, S. Fedosov, M. Labuz and K. Kucab declare no conflicts of interest. The member of the Organizing committee L. Nykyruy, declares no conflict of interest and has not interfered in the evaluation process of this article, in accordance with international publication ethics standards. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

Ольга ПОДПАЛОВА¹, канд. біол. наук
ORCID ID: 0000-0002-8795-5541
e-mail: olgapodpalova@knu.ua

Євдокія РЕШЕТНИК¹, канд. біол. наук
ORCID ID: 0000-0003-1084-842X
e-mail: yevdokiareshetnik@knu.ua

Ірина ПРИБИТЬКО¹, канд. біол. наук
ORCID ID: 0000-0003-1487-166X
e-mail: prybytko@knu.ua

Руслан МНЕВЕЦЬ¹
ORCID ID: 0000-0001-9614-5762
e-mail: ruslan.mnevets@knu.ua

Олександр КОВАЛЬЧУК, д-р мед. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0002-6311-3518
e-mail: kovalchuk@knu.ua

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

НАУКОВІ СТУДЕНТСЬКІ ГУРТКИ ЯК ЕФЕКТИВНИЙ КОМПОНЕНТ СУЧАСНОЇ МЕДИЧНОЇ ОСВІТИ

Вступ. Наукові студентські гуртки відіграють принципово важливу роль у підготовці майбутніх фахівців-медиків, сприяючи глибшому розумінню теоретичних і практичних аспектів цієї міждисциплінарної сфери. Вони створюють середовище, у якому студенти можуть активно залучатися до наукових досліджень, що має безпосередній вплив на їхній професійний розвиток і кар'єрні перспективи.

Методи. Використано теоретичні методи: аналіз і синтез, абстрагування, конкретизація, індукція та дедукція, моделювання, гіпотезо-дедуктивний та системний підходи.

Результати. Вивчено підходи до організації та функціонування наукових студентських об'єднань та їх взаємодію в ННЦ "Інститут біології та медицини" КНУ імені Тараса Шевченка. Проаналізовано досвід роботи чотирьох наукових студентських гуртків: анатомії імені В.О. Беца, фізіології іменем О.П. Вальтера, патофізіології імені В.В. Підвисоцького та імерсивних технологій. Продемонстровано високу ефективність цього компонента медичної освіти. Показано, що наукові гуртки забезпечують інтеграцію теоретичних знань з практичною діяльністю.

Висновки. Вивчення досвіду наукових гуртків є актуальним завданням, дозволяє акцентувати увагу на їх ролі у формуванні висококваліфікованих, мотивованих і компетентних фахівців, що сприяє підвищенню якості освіти та підготовці студентів до професійної діяльності в сучасних умовах.

Ключові слова: наукові гуртки, методи навчання, імерсивні технології, заняття.

Вступ

Наукові студентські гуртки є важливою складовою освітнього процесу у вищих навчальних закладах (Ярошенко, Скиба, & Тітаренко, 2015). Їх призначення полягає у розвитку наукового мислення, дослідницьких навичок,

© Подпалова Ольга, Решетнік Євдокія, Прибытько Ірина,
Мневєць Руслан, Ковальчук Олександр, 2024

професійного зростання та особистісного розвитку студентів. Вони забезпечують можливість глибшого вивчення дисциплін, з якими студенти знайомляться під час навчання, і сприяють їх залученню до активної наукової діяльності (Верховна Рада України, 2024). Участь у наукових гуртках допомагає студентам засвоїти основи наукового дослідження, а саме: формулювання гіпотез, планування експериментів, обробку та інтерпретацію результатів. Студенти отримують можливість працювати з лабораторним обладнанням, проводити експерименти, збирати й аналізувати дані (Ярошенко, & Скиба, 2015, с. 149–153). Зважаючи на різноплановість завдань, які можуть бути поставлені перед студентами-гуртківцями, важливо проаналізувати методологічну доцільність і перспективність різних напрямів роботи наукових студентських гуртків.

Методи

Теоретичні методи дослідження передбачають аналіз та синтез, що дозволяє детально розглядати структуру гуртків, їхню діяльність та результати, а також об'єднувати отримані дані для формування цілісного уявлення про їхній вплив на підготовку студентів. Абстрагування та конкретизація допомагають визначити основні характеристики успішних наукових гуртків і застосувати ці знання для вдосконалення їхньої роботи. Індукція та дедукція сприяють виведенню загальних принципів функціонування гуртків з окремих випадків та конкретизації цих принципів у реальних умовах. Моделювання дозволяє створювати теоретичні моделі організації та роботи гуртків, що можуть бути перевірені на практиці. Гіпотетико-дедуктивний метод забезпечує висування гіпотез щодо ефективності різних аспектів діяльності гуртків та їх перевірку на основі зібраних даних. Системний підхід дозволяє розглядати гуртки як частину ширшої системи освітнього процесу, ураховуючи їх взаємозв'язки з іншими елементами цієї системи. Використання цих методів сприяє глибшому розумінню ролі наукових гуртків у професійному розвитку студентів і формуванні їх дослідницьких навичок.

Результати

На кафедрі фізіології та анатомії ННЦ "Інститут біології та медицини" морфологічний науковий клуб забезпечує функціонування чотирьох наукових гуртків. Керівники гуртка анатомії імені В.О. Беца ставлять такі завдання: надати студентам можливість глибше ознайомитися з будовою людського тіла, функціями органів і систем, залучити майбутніх медиків до проведення наукових досліджень, експериментів та аналізу даних. Теоретична складова гуртка передбачає проведення регулярних лекцій і семінарів з анатомії людини, на яких виступають провідні викладачі та науковці. Практична складова гуртка передбачає роботу з анатомічними препаратами, навчальними муляжами та заняття в лабораторіях віртуальної реальності (VR) ННЦ "Інститут біології та медицини", що дозволяє максимально візуалізувати навчальний матеріал, а це, у свою чергу, сприяє розвитку важливих професійних навичок. Таким чином, діяльність цього гуртка дозволяє студентам отримати цінний досвід, такий необхідний для їхньої майбутньої

професійної діяльності, і сприяє формуванню нових поколінь висококваліфікованих медиків та науковців.

Гурток фізіології імені О.П. Вальтера має декілька напрямів роботи. До теоретико-практичного напрямку належить обговорення актуальних аспектів фізіологічних досліджень і значення наукових відкриттів у фізіології для розвитку медичної науки; представлення та обговорення наукових доповідей студентів – учасників гуртка. Тематику доповідей пропонують самі студенти з обґрунтуванням актуальності обраного наукового напрямку, що дозволяє навчитися грамотно оперувати результатами власного наукового пошуку та коректно вести наукову дискусію (Тітаренко, 2015, с. 243–247).

Практичний напрям роботи гуртка передбачає підготовку навчальних відеоматеріалів, відповідно до робочої навчальної програми з фізіології. За два роки роботи гуртка підготовано декілька навчальних відео, які успішно використовують у процесі викладання фізіології. Ще один практичний аспект діяльності – робота з обладнанням і методиками, які застосовують у фізіологічних дослідженнях під час медико-діагностичних обстежень (зокрема, ЕКГ, ЕЕГ тощо).

Діяльність гуртка патофізіології імені В.В. Підвисоцького зосереджено на розгляді актуальних проблем сучасної медицини. На засідання гуртка регулярно запрошують лікарів-клініцистів із провідних закладів охорони здоров'я міста Києва, а також інших країн. Під час засідань гуртківці мають можливість опановувати інструментальні методи дослідження та ознайомитися з діагностичними портретами вивчених патологій, зокрема на апараті ультразвукової діагностики, що є практичним напрямом роботи гуртка. Двоє гуртківців були залучені до участі в "Gynecological Endocrinology the 21st World Congress" (Італія, м. Флоренція, 8–11 травня 2024 р.) як співавтори двох постерних доповідей (Козинець Є. О., Шульдякова Я. І.). У поточному навчальному році гуртківці стали переможцями та призерами I туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт зі спеціальності "Медицина" (Головащенко Юлія Андріївна, 2 курс 2 група), а також XXI Міжнародної конференції "Шевченківська весна: досягнення в науках про життя".

Гурток імерсивних технологій та лабораторія віртуальної реальності є важливою складовою сучасного навчального процесу для студентів-медиків. Використання імерсивних технологій – віртуальної (VR) та доповненої реальності (AR) – надає можливість підвищити якість освіти, зробити її більш інтерактивною, доступною та ефективною (Волинець, 2021, с. 40–47). Використання VR-технологій допомагає студентам у вивченні анатомії людського тіла у тривимірному просторі. Студенти можуть досліджувати внутрішні органи, системи та структури тіла з високою деталізацією, що сприяє глибшому розумінню матеріалу (Kovalchuk et al., 2020, с. 158–164). Віртуальні симулятори дозволяють студентам відпрацьовувати медичні маніпуляції, хірургічні втручання та інші клінічні процедури в безпечному середовищі. Це знижує ризик помилок у реальній клінічній практиці та підвищує впевненість у своїй силі як майбутніх лікарів. Створення

реалістичних клінічних сценаріїв за допомогою VR допомагає студентам відпрацьовувати діагностичні та терапевтичні навички, приймати рішення в умовах, що наближені до реальних. Це сприяє розвитку клінічного мислення та підготовці до роботи в реальних умовах (Малицька, 2021, с. 110–113).

Дискусія і висновки

Взаємодія гуртків "Морфологічного клубу" кафедри фізіології та анатомії ННЦ Інститут біології та медицини Київського національного університету імені Тараса Шевченка – вдалий методологічний підхід до інтеграції медико-біологічних навчальних дисциплін в єдиний освітній комплекс. Головна перевага наукових гуртків – можливість для студентів працювати із сучасним обладнанням. Практичний досвід роботи з технологіями незамінний для підготовки висококваліфікованих спеціалістів. Наукові гуртки також сприяють розвитку дослідницьких навичок, що необхідні для успішної кар'єри. Студенти навчаються формулювати гіпотези, планувати та проводити експерименти й обстеження, аналізувати й інтерпретувати дослідну та діагностичну інформацію.

Внесок авторів: Ольга Подпалова – написання оригінальної чернетки; Євдокія Решетник – концептуалізація; Ірина Прибитко – написання, перегляд і редагування; Руслан Мневєць – методологія; Олександр Ковальчук – валідація даних.

Список використаних джерел

Волинець, В. (2021). Використання технологій віртуальної реальності в освіті. *Неперервна професійна освіта: теорія і практика. Серія "Педагогічні науки"*, 2, 40–47. <https://doi.org/10.28925/1609-8595.2021.2.5>

Верховна Рада України. (2024). *Про вищу освіту* (закон України від 2016, ред. від 28.05.2024). <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/1556-18/page>

Малицька І.Д. (2021). Імерсивні технології в навчанні природничим наукам: зарубіжний досвід. Імерсивні технології в освіті, 110–113.

Тітаренко, Н.Ю. (2015) Педагогічні умови формування дослідницької компетентності студентів. *Вища освіта України: теоретичний та науково-методичний часопис. Дод. 1: Інтеграція вищої освіти і науки*, 3, 243–247.

Ярошенко О.Г., & Скиба Ю.А. (2015). Індивідуальні науково-дослідні завдання як один із засобів організації навчання через дослідження у вищих навчальних закладах України. *Імідж сучасного педагога*, 5(154), 149–153.

Ярошенко, О., Скиба, Ю., Тітаренко, Н. (2015). *Аналіз практичного стану науково-дослідницької діяльності суб'єктів навчально-виховного процесу університетів (аналітичні матеріали)* [Рукопис]. (О. Ярошенко, Ред.). Інститут вищої освіти НАПН України. https://ihed.org.ua/wp-content/uploads/2018/09/Analiz_stanu_nauk-diyaln_subyektiv_BHZ_2015_97p_IBO_Yaroshenko-Skiba-Titarenko.pdf

Kovalchuk, O.I., Bondarenko, M.P., Okhrey, A.G., Prybytko, I.Y., & Reshetnyk, E.M. (2020). Features of using immersive technologies (virtual and augmented reality) in medical education and practice. *Morphologia*, 14(3), 158–164. <https://doi.org/10.26641/1997-9665.2020.3.158-164>

References

Kovalchuk, O.I., Bondarenko, M.P., Okhrey, A.G., Prybytko, I.Y., & Reshetnyk, E.M. (2020). Features of using immersive technologies (virtual and augmented reality) in medical education and practice. *Morphologia*, 14(3), 158–164. <https://doi.org/10.26641/1997-9665.2020.3.158-164>

Malyska I.D. (2021). *Immersive technologies in teaching natural sciences: foreign experience*. Immersive technologies in education, 110–113 [in Ukrainian].

Titarenko, N.Yu. (2015). *Pedagogical conditions for the formation of students' research competence. Higher education of Ukraine: theoretical and scientific-methodical journal. Add. 1: Integration of higher education and science*, 3, 243–247 [in Ukrainian].

Yaroshenko O.G., Skyba Yu.A. (2015). Individual research tasks as one of the means organization of study through research in higher educational institutions of Ukraine". *The image of a modern teacher*, 5(154), 149–153 [in Ukrainian].

Yaroshenko, O., Skyba, Yu., Titarenko, N. (2015). *Analysis of the practical state of scientific and research activities of subjects of the educational and educational process of universities (analytical materials)* [Manuscript]. (O. Yaroshenko, Ed.). Institute of Higher Education of the National Academy of Sciences of Ukraine [in Ukrainian]. https://ihed.org.ua/wp-content/uploads/2018/09/Analiz_stanu_nauk-diyaln_subyektiv_BHZ_2015_97p_IBO_Yaroshenko-Skiba-Titarenko.pdf

Verkhovna Rada of Ukraine. (2024). On higher education (law of Ukraine from 2016, revised from 05.28.2024) [in Ukrainian]. <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/1556-18/page>

Volynets V. (2021). The use of virtual reality technologies in education.. *Continuous professional education: theory and practice. Series "Pedagogical Sciences"*, 2, 40–47 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.28925/1609-8595.2021.2.5>

Отримано редакцією збірника / Received: 26.06.24

Прорецензовано / Revised: 22.07.24

Схвалено до друку / Accepted: 30.09.24

Olga PODPALOVA¹, PhD (Biol.)
ORCID ID: 0000-0002-8795-5541
e-mail: olgapodpalova@knu.ua

Evdokia RESHETNIK¹, PhD (Biol.)
ORCID ID: 0000-0003-1084-842X
e-mail: yevdokiareshetnik@knu.ua

Iryna PRIBYTKO¹, PhD (Biol.)
ORCID ID: 0000-0003-1487-166X
e-mail: prybytko@knu.ua

Ruslan MNEVETS¹
ORCID ID: 0000-0001-9614-5762
e-mail: ruslan.mnevets@knu.ua

Oleksandr KOVALCHUK¹, DSc (Med.)
ORCID ID: 0000-0002-6311-3518
e-mail: kovalchuk@knu.ua

¹Taras Shevchenko Kyiv National University, Kyiv, Ukraine

SCIENTIFIC STUDENT GROUPS AS AN EFFECTIVE COMPONENT OF MODERN MEDICAL EDUCATION

Introduction. *Scientific student circles play a fundamentally important role in the training of future medical specialists, contributing to a deeper understanding of the theoretical and practical aspects of this interdisciplinary field. They create an environment where students can be actively involved in scientific research, which has a direct impact on their professional development and career prospects.*

Methods. *The research uses theoretical methods such as analysis and synthesis, abstraction, concretization, induction and deduction, modeling, hypotheco-deductive and systemic approach.*

Results. *Approaches to the organization and functioning of scientific student associations and their interaction in the ESC "Institute of Biology and Medicine" of Taras Shevchenko KNU were studied.*

The work experience of four scientific student circles was analyzed: the anatomy circle named after V.O. Betsa, circle of physiology named after O.P. Walter, the pathophysiology circle named after V.V. Pidvysotsky and the immersive technologies circle demonstrates the high efficiency of this component of medical education. It has been demonstrated that scientific circles provide integration of theoretical knowledge with practical activities.

Conclusions. *Thus, writing an article about scientific circles is a relevant and important task that allows to emphasize their role in the formation of highly qualified, motivated and competent specialists. This contributes to the improvement of the quality of education and scientific research in higher educational institutions, as well as the preparation of students for professional activities in the conditions of modern society.*

Keywords: *scientific circles, teaching methods, immersive technologies, classes.*

Автори О. Подпалова, Є. Решетнік, І. Прибійко, Р. Мневєць та О. Ковальчук заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors O. Podpalova, E. Reshetnik, I. Pribytko, R. Mnevets and O. Kovalchuk declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

АЛГОРИТМ НОСТРИФІКАЦІЇ МЕДИЧНИХ ФІЗИКІВ ВІДПОВІДНО ДО ВИМОГ ЄВРОСОЮЗУ

Проведено аналіз методичних законодавчих актів європейських організацій щодо професійного визнання фахівців з медичної фізики. Узагальнено результати власного досвіду, наведено алгоритм нострифікації спеціалістів, зазначено шляхи визначення кваліфікації медичного фізика відповідно до вимог ЄС. Для поліпшення статусу медичної фізики в Україні та офіційного визнання медичних фізиків необхідно гармонізувати навчальні програми, розробити курси післядипломної освіти медичних фізиків, які не мають безпосередньо дипломи "медична фізика", розробити програми спеціалізації медичних фізиків, ужити заходів з приведення штатних розписів до Європейської рамки кваліфікацій.

Ключові слова: медична фізика, фахівці з медичної фізики, визнання, нострифікація.

Вступ

Величезний прогрес у сучасній медицині за останні десятиліття був значною мірою започаткований і сформований внеском медичної фізики. Успішне, ефективне та грамотне застосування новітніх знань у медико-клінічних і передклінічних дослідженнях потребує участі медичних фізиків як у сфері використання іонізуючого, так і неіонізуючого випромінювання.

Кваліфікаційні вимоги до медичних фізиків викладено в Європейських керівництвах з радіаційного захисту № 174, Керівництві МАГАТЕ з сертифікації медичних фізиків, рекомендаціях Європейської асоціації медичних фізиків (EFOMP) та імплементовано в країнах Євросоюзу. Відповідно до вимог цих організацій кваліфікація, рівень підготовки та досвід медичного фізика визначає компетентний фаховий орган. Після відповідної акредитації медичний фізик може бути залучений до дозиметрії пацієнтів, розробки і використання складних процедур та обладнання, оптимізації, забезпечення якості, включаючи контроль якості, а також може виступати як експерт з інших питань радіаційної безпеки.

Медичний фізик безпосередньо долучається до процесу променевої терапії пацієнта та стандартних процедур ядерної медицини. Для інших радіологічних процедур (рентгенодіагностичних, скринінгових тощо) медичний фізик має бути залучений до процесу оптимізації рентгенодіагностичних процедур, проведення аудитів, нестандартних процедур, гібридних методів діагностики та питань радіаційного захисту під час медичного опромінення (European Commission, 2014; IAEA, 2021; Byrne et al., 2023).

На сьогодні більшість фахівців із медичної фізики, що працюють у державних онкологічних центрах України, займають посади інженерів-фізиків та інженерів-радіологів і мають дипломи спеціалістів / магістрів у суміжних галузях фізики та інженерії. Питання узгодження посади, кваліфікації, офіційного визнання та статусу медичних фізиків у системі охорони здоров'я України є відкритим не один рік.

Через повномасштабне вторгнення росії на територію України багато спеціалістів різних професій вимушені були виїхати за кордон. У цілому питання нострифікації українських дипломів і професійного визнання фахівців стало суттєвим для багатьох спеціальностей через неузгодженість українського та європейського законодавства. Особливо гостро стоїть питання нострифікації та конкурентоспроможності з європейськими колегами для фахівців із медичної фізики, оскільки в повному обсязі не вирішено питання визнання цієї спеціальності в Україні.

Мета роботи – аналіз алгоритму та визначення шляхів нострифікації медичних фізиків відповідно до вимог Євросоюзу. Проаналізовано методичні і законодавчі акти європейських організацій щодо професійного визнання фахівців із медичної фізики. Узагальнено результати власного досвіду та наведено алгоритм нострифікації спеціалістів відповідно до офіційної процедури на прикладі австрійського законодавства, зазначено шляхи з визначення кваліфікації медичного фізика згідно з вимогами ЄС.

Аналіз законодавчих актів ЄС показав, що для громадян Європейського Союзу або Європейської економічної зони, а також громадян Швейцарії, доступ до регульованих професій регулює Директива 2005/36/ЄС про професійне визнання (European Parliament, 2005). Документ передбачає правила взаємного визнання професійних кваліфікацій, що забезпечує вільний доступ до ринку праці держав-членів. Необхідно зазначити, що передумовою для професійного визнання українців у країнах ЄС має стати відповідний професійний закон в Україні.

Відповідно до Директиви 2005/36/ЄС існують два шляхи визнання дипломів. *Першим* і найпростішим шляхом оцінювання є спрощена процедура визнання диплома, за якою надається офіційний висновок із порівняння диплома закордонного зразка з відповідною спеціальністю в ЄС, інформацію про навчальний заклад, основну класифікацію (рівень, обсяг освіти тощо) (European Parliament, 2005). Необхідно зазначити, що з деякими країнами, які не є членами ЄС, існують двосторонні угоди, які гарантують еквівалентність дипломів про вищу освіту.

Другий шлях визнання дипломів складніший. На відміну від більшості інженерних не регламентованих посад, до фахівців з медичної фізики, як і до лікарів, висувають більш високі вимоги, оскільки ця категорія фахівців безпосередньо залучена до процесу діагностики та лікування пацієнтів. Посада медичного фізика є визнаною медичною професією в країнах ЄС. Якщо медичний

фізик має диплом країн, що не входять до Євросоюзу, і має намір отримати відповідну європейську сертифікацію, необхідно пройти процедуру нострифікації – визнання іноземного диплома як повного еквівалента відповідного європейського ступеня. Після нострифікації диплома, що може тривати від кількох місяців до року й більше, номінант має рівноправові наслідки, як і спеціаліст, що отримав диплом країни ЄС, зокрема, право займатися певною регульованою професією або мати науковий ступінь (Burne et al., 2023).

За процес нострифікації відповідають університети, технічні коледжі та професійні організації, які пропонують відповідний курс навчання і мають комісію, що уповноважена проводити оцінювання компетентності фахівця. Оскільки робота медичних фізиків вимагає специфічних практичних і теоретичних знань, які виходять за межі навчальної програми курсу фізики, то медичний фізик потребує відповідної післядипломної освіти, підвищення кваліфікації та безперервного професійного розвитку (IAEA, 2021; (European Parliament, 2005).

Відповідно до рекомендацій EFOMP та Європейської рамки кваліфікацій (European Qualifications Framework, EQF; http://ec.europa.eu/eqf/home_en.htm) медичний фізик повинен мати повну вищу освіту (кваліфікація "Магістр") із фізики, медичної фізики або біомедичної інженерії та отримати щонайменше 300 кредитів за системою European Credit Transfer System (ECTS). За відсутності фахової освіти за спеціальністю "Медична фізика" сертифікат медичного фізика в країнах ЄС також може отримати фахівець, що має еквівалентну вищу освіту в суміжних галузях науки, зокрема ядерної фізики, фізики радіонуклідів тощо.

Для випускників магістратури за науково-технічним напрямом, що близький до медичної фізики, при визнанні еквівалентності диплома та допуску до процесу нострифікації (для випускників країн, що не входять до Євросоюзу) або сертифікації (для випускників європейських університетів, що мають споріднену спеціальність), обов'язковим є успішне закінчення таких курсів (Birkfellner et al., 2020), як:

- вступ до фізики або курс загальної фізики (не менше 20 ECTS);
- ядерна фізика та фізика ізотопів (10 ECTS);
- лекції та практичні заняття з методів розрахунку у фізиці (5 ECTS);
- лекції та практичні заняття з прикладної математики (7 ECTS);
- лекції та практичні заняття з методів математичного моделювання (8 ECTS);
- лекції та навчальні заняття з теоретичної фізики (10 ECTS).

Номінант може подати заяву на допуск до процесу професійного визнання через державні органи та національні асоціації медичних фізиків, якщо вони мають відповідні повноваження та відповідну сертифікацію (Birkfellner et al., 2020). Еквівалентність професійної освіти фахівців з інших країн перевіряє окрема комісія, до якої входять від трьох до п'яти експертів з медичної фізики. За необхідності комісія встановлює відповідні умови для забезпечення досягнення еквівалентності та приймає рішення про рівень кваліфікації. За

наявності академічної різниці фахівець з медичної фізики має змогу пройти акредитовані курси з медичної фізики без відриву від виробництва з неповним робочим днем, сертифіковані освітні та навчальні заходи, дистанційне або онлайн-навчання, що мають відповідну акредитацію. Професійне визнання фахівців із країн, що не входять до Європейського Союзу, проводять відповідно до керівних принципів EFOMP (Byrne et al., 2023).

Програма перекваліфікації або сертифікації фахівця з медичної фізики за наявності підтвердженого еквівалентного диплома передбачає дуальну освіту – отримання як теоретичних, так і практичних клінічних знань. Здобувачу необхідно продемонструвати додатково щонайменше 360 год теоретичної підготовки, серед яких щонайменше 150 год у таких сферах (Birkfellner et al., 2020): анатомія; фізіологія; біофізика; біоматематика; біомедичні технології; менеджмент медичного закладу; радіаційна біологія; радіаційний захист.

Здобувач повинен також мати щонайменше 210 год спеціалізованих курсів з медичної фізики з поглиблених знань і практичного досвіду в клінічно значущій субдисципліні медичної фізики, знання основ і загальних принципів двох (максимум трьох) інших субдисциплін медичної фізики.

Фаховий практичний курс післядипломної освіти за спеціальністю "Медична фізика" має до шести семестрів (60 ECTS) і є аналогом ординатури лікарів. У деяких країнах ЄС, зокрема в Австрії, післядипломний курс "Медична фізика" відбувається на базі клінічних кафедр медичних університетів або департаментів радіології університетських лікарень і має декілька напрямів спеціалізації (European Commission, 2014; IAEA, 2021; Byrne et al., 2023; http://ec.europa.eu/eqf/home_en.htm): радіаційна онкологія; медична візуалізація; ядерна медицина; радіаційний захист; оптика; аудіологія.

Підсумуємо вищезазначене: для отримання сертифіката медичного фізика європейського зразка необхідно пройти процедуру нострифікації диплома, за наявності академічної різниці пройти спеціалізовані теоретичні та практичні курси з медичної фізики, а також обов'язково отримати подальшу клінічну спеціалізацію. Таким чином, для початку практичної діяльності на посаді медичного фізика фахівець має продемонструвати сумарно не менше 360 кредитів ECTS.

Як і фахівці вищої медичної ланки медичні фізики повинні мати безперервний професійний розвиток і проходити сертифікацію щонайменше раз на п'ять років (European Commission, 2014; Birkfellner et al., 2020). Перед початком роботи на новому типі рентгенодіагностичного чи радіонуклідного обладнання або апараті променевої терапії необхідно насамперед отримати відповідну спеціалізацію. Такий підхід сприяє покращенню якості променевої терапії та діагностики, отриманню нових знань у галузі медичної фізики, зменшує ризики для пацієнта, що пов'язані як з фізичною безпекою, так і з біологічними ефектами іонізуючого випромінювання.

Дискусія і висновки

Для поліпшення статусу медичної фізики в Україні, офіційного визнання медичних фізиків та їх конкурентоспроможності з європейськими колегами необхідно:

- гармонізувати навчальні програми як у галузі медичної фізики, так і в суміжних дисциплінах;
- укласти двосторонні угоди (за можливості) з європейськими країнами, що гарантують еквівалентність вищої освіти;
- розробити курси післядипломної освіти медичних фізиків, які не мають безпосередньо дипломи за фахом "Медична фізика";
- розробити програми спеціалізації медичних фізиків (аналог ординатури лікарів);
- ужити заходів щодо приведення штатного розкладу медичних закладів відповідно до Європейської рамки кваліфікацій – EQF (http://ec.europa.eu/eqf/home_en.htm).

Поліпшення післядипломної освіти, підвищення кваліфікації, безперервний професійний розвиток і проведення належної сертифікації відповідно до вимог ЄС і керівництв МАГАТЕ забезпечить комплексне, безпечне та якісне надання медичної допомоги пацієнтам.

Список використаних джерел

- Birkfellner, W., Georg, D., Künzler, T., Stücklschweiger, G., Warwitz, B., & Zurl, B. (2020). *Regulation on Certification of Medical Physicists and Medical Physics Experts*. RLMPE.
- Byrne, B.L., Marcu, L., Mazzoni, N., & Caruana C.J. (2023). EFOMP. Malaga Declaration 2023: An updated vision on Medical Physics in Europe. *Physica Medica*, 111, 102620, 1–3.
- European Parliament. (2005, September 7). *Directive 2005/36/EC of the European Parliament and of the Council of on the recognition of professional qualifications*. Official J. Eur. Communities.
- European Commission. (2014). *Radiation Protection No 174. European Guidelines on Medical Physics expert*. Office for official publications of the European communities.
- IAEA. (2021). *Guidelines for the Certification of Clinically Qualified Medical Physicists*. Training Course Series 71. IAEA.

References

- Birkfellner, W., Georg, D., Künzler, T., Stücklschweiger, G., Warwitz, B., & Zurl, B. (2020). *Regulation on Certification of Medical Physicists and Medical Physics Experts*. RLMPE.
- Byrne, B.L., Marcu, L., Mazzoni, N., & Caruana C.J. (2023). EFOMP. Malaga Declaration 2023: An updated vision on Medical Physics in Europe. *Physica Medica*, 111, 102620, 1–3.
- European Parliament. (2005, September 7). *Directive 2005/36/EC of the European Parliament and of the Council of on the recognition of professional qualifications*. Official J. Eur. Communities.
- European Commission. (2014). *Radiation Protection No 174. European Guidelines on Medical Physics expert*. Office for official publications of the European communities.
- IAEA. (2021). *Guidelines for the Certification of Clinically Qualified Medical Physicists*. Training Course Series 71. IAEA.

Отримано редакцією збірника / Received: 01.07.24

Прорецензовано / Revised: 22.07.24

Схвалено до друку / Accepted: 01.10.24

Olga NOSYK, PhD (Biol.), Researcher

ORCID ID: 0000-0001-7945-7393

e-mail: nosyk_olga@ukr.net

Grigorev Institute for Medical Radiology and Oncology, Kharkiv, Ukraine

NOSTRIFICATION ALGORITHM OF MEDICAL PHYSICIST IN ACCORDANCE WITH EC REQUIREMENTS

The analyses of methodological and legislative acts of European organizations regarding the professional recognition of medical physics specialists was carried out. The result of own experience is summarized. The algorithm of nostrifications is given and the ways of determining the qualification of a medical physicist in accordance with EU requirements are indicated. In order to improve the status of medical physics in Ukraine and to officially recognize medical physicists, it is necessary to harmonize educational programs, develop postgraduate education courses for medical physicists who do not directly have medical physics diplomas, develop specialization programs for medical physicists, to take measures to bring the staffing schedule to the European Qualifications Framework.

Key words: *medical physics, specialists in medical physics, recognition, nostrification.*

Автор О. Носик заявляє про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The author O. Nosyk declares no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

РАДІАЦІЙНИЙ ЗАХИСТ RADIATION PROTECTION

UDC 616-073.7+615.84]:621.38+535-34

DOI: <https://doi.org/10.17721/3041-1491/2024.11-09>

Sören MATTSSON, PhD, Prof.

ORCID ID: 0000-0002-6443-1913

e-mail: soren.mattsson@med.lu.se

Lund University, Skåne University Hospital Malmö, Sweden

CURRENT DEVELOPMENTS IN MEDICAL RADIATION PHYSICS AND RADIATION PROTECTION

The paper reviews current trends and future directions for diagnostics and therapy with ionizing radiation. Recent advances in medical physics applied to radiation therapy, diagnostic radiology, nuclear medicine, MRI, and radiation safety are summarized. Today, much of the development is concentrated on providing conditions for individualized diagnostics and therapy for the patient, which requires increased precision and accuracy in both radiological diagnostics and radiotherapy. Areas of active development are the use of artificial intelligence (AI) for improved and more efficient diagnostics and therapy, theranostics, radiomics and dosiomics. All these approaches are parts of the so-called precision or personalized medicine. The ongoing revision of the ICRP's radiation protection recommendations is also commented on. For dose and risk estimates in diagnostic applications (X-ray imaging, CT, interventional radiology, diagnostic nuclear medicine) a change from population-based average phantoms, calculation methods and risk figures to patient-specific calculation methods, phantoms and risk figures (as is done in radiotherapy) is proposed.

Key words: radiotherapy, diagnostics, dosimetry, safety, CT, PET, MR-Linac, AI.

Introduction

Radiation diagnostics using X-rays and nuclear medicine methods are of crucial importance for the correct diagnosis of various disease states and for follow-up of treatments. The development of the technologies is going very fast. The use of CT is increasing dramatically in many countries. At the same time, the diagnostic methods based on non-ionizing radiation, such as MRI and ultrasound, are also developing rapidly. The improved diagnostics provide conditions for an improved and more individually tailored treatment of various diseases, including cancer, for which radiation therapy retains its place as an important treatment method alone or most often together with surgery, chemotherapy and now also immunotherapy. While it is important to fully exploit the potential of ionizing radiation for improved medical diagnostics and therapy, the side effects of the radiation must be under control. This applies to deterministic tissue effects as well as stochastic (mainly cancer) effects. This review article intends to highlight the ongoing development in medical radiation diagnostics and therapy. It is an update of earlier reviews in the field, e.g. (Mattsson, & Adlienè, 2013; Mattsson, Adlienè, & Laurikaitienè, 2023). At the same time, the ongoing revision of society's radiation protection standards will be highlighted.

© Mattsson Sören, 2024

Materials and methods

Diagnostic methods. Since 2010, there has been a new imaging technology using ionizing radiation on the market every five years (IAEA, 2024; compare Fig. 1). After introduction, it has shown to take in average 10–15 years for a more widespread implementation in clinical practice (IAEA, 2024).

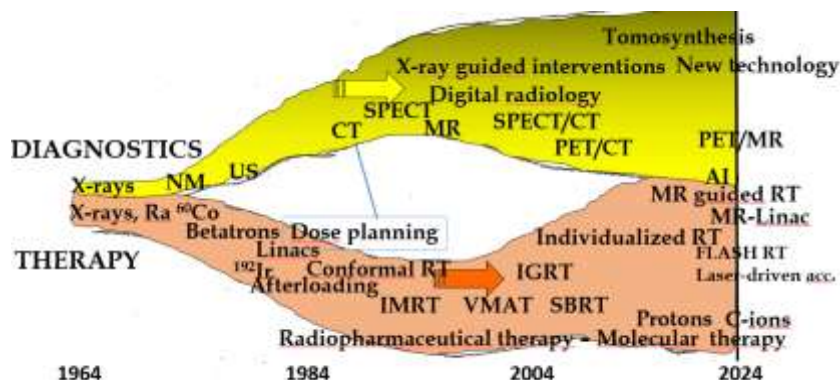


Fig. 1. Schematic description of developments in medical physics for diagnostics as well as radiation therapy since the 1960's.

IMRT=intensity modulated radiation therapy, VMAT=volumetric modulated arc therapy, IGRT=image guided radiation therapy, SBRT=stereotactic body radiation therapy, NM=nuclear medicine, US=ultrasound, CT=computed tomography, SPECT=single photon computed tomography, PET=positron emission tomography, MR(I)=magnetic resonance (imaging), AI=artificial intelligence

The most common types of new imaging techniques implemented in diagnostic and interventional radiology are photon-counting CT, dual-energy CT and cone beam CT (CBCT) scanners, and breast tomosynthesis systems. The use of CT has been instrumental in the improvements of radiation therapy dose planning. Using CBCT for image-guided radiation therapy ensures a more precise delivery of the absorbed dose than was previously possible, but it will also cause an increase in the patient dose outside the treated volume.

Whole body PET/CT scanners have become more and more common in clinical practice. Recently, a new image reconstruction method that enables simultaneous imaging of two PET substances at the same time (Pratt et al., 2023) has been developed. One can be labelled with a pure β^+ -emitter (e.g. ^{18}F) and the other with a positron emitter which also simultaneously emits a gamma-photon (e.g. ^{124}I). With the help of this "multiplexed PET", the amount of information is increased during a single scan. Also the use of SPECT/CT has increased in the managing of chronic diseases. The use of other so called hybrid imaging technologies combining *anatomic* (ultrasound, CT, and/or magnetic resonance (MR) imaging (MRI) and *molecular imaging modalities* (SPECT and PET) is also increasing.

Therapeutic methods. The use of multi-modality imaging in radiation therapy is increasing significantly. It is an important task to optimise these images – for improved

target volume definition, treatment planning, for image-guided radiotherapy, for monitoring the motion during treatment and for response evaluation.

External radiation therapy. Computed tomography (CT) has, as mentioned above, revolutionized external beam radiation therapy by making it possible to visualize and segment tumors and organs at risk in a three-dimensional manner. However, CT has some limitations in terms of tissue characterization and delineation. Over the last decade there has been an increased clinical use of both MRI and PET to enable accurate delineation of the target volume (Decazes et al., 2021). The radiotherapy workflow does however still depend on CT information as the treatment planning softwares require attenuation data to be able to perform accurate dose calculation and to generate reference images for positioning. It has been shown that it is possible to generate CT equivalent information based on MR data, and with this technology it will be possible to abandon the CT for those diagnoses where MR is the modality of choice for target delineation (Nyholm, & Jonsson, 2015).

Three-dimensional conformal radiotherapy, intensity-modulated radiotherapy (IMRT), stereotactic body radiotherapy (SBRT), and image-guided radiotherapy (IGT) have facilitated tumour delineations and dose delivery. Today modulated radiation treatment techniques are used for both photon and particle beam irradiations. The most common technique today is volumetric modulated arc therapy (VMAT) delivered with high energy photon beams (Koka et al., 2022). The introduction of modulated treatment techniques has for some patient groups been revolutionising, e.g. for those with head and neck cancer and cancer in the pelvic region (Bäck et al., 2017). The modulated techniques are however associated with an increased treatment complexity and a larger uncertainty in the delivered dose distribution to the patient compared to the conventional treatment technique (Bäck et al., 2017). An important task is therefore to evaluate and reduce the absorbed dose uncertainty for modulated radiation therapy. A reduced dose uncertainty makes it possible to improve the quality of the treatments to enable a higher degree of individual adaption and optimisation and to increase the quality of clinical trials (Götstedt, Karlsson, & Bäck, 2023). There is still a need to improve target volume definition and also to explore the possibilities of artificial intelligence (AI) and automation (Fromherz, & Makary, 2022). The recent combination of MR scanners with treatment machines (MR-Linacs) has pushed the integration of treatment and imaging further, enabling simultaneous visualization and treatment of the target (Liu, Li, & Yin, 2023). Recently an on-line ionising radiation acoustic imaging system has been developed, which directly images the absorbed dose distribution inside the patient without interfering with the treatment delivery (Zhang et al., 2023).

Proton therapy is a promising treatment technique especially for patients whose tumors are close to sensitive organs in the head, chest, or abdominal cavity. A proton beam can be controlled more precisely than traditional photon radiation, which can reduce the risk of side effects. The energy in a proton beam can be varied so that the radiation dose almost entirely ends up at a certain predetermined depth. Therefore, radiation with proton therapy can be almost completely concentrated on the tumor itself,

thus the absorbed dose can be increased, while maintaining a low dose to the surrounding normal tissues. Proton therapy is particularly suitable for children and adolescents since fewer long-term side effects are expected than from conventional therapy. In a few places in the world, therapy is also done with heavier ions, usually carbon ions. Compared to protons, the carbon ion beams add to the geographical precision also a higher biological effectiveness for treatment of some specific types of cancer.

FLASH radiotherapy is defined as an ultra-fast delivery of radiation at absorbed dose rates several orders of magnitude greater than those used in conventional radiotherapy (40 Gy/s versus 0.5–5 Gy/min). Recent animal studies have shown that FLASH radiotherapy can reduce radiation-induced damage in healthy tissues (Giuliano et al., 2023). Before FLASH can be used routinely in the clinic, the biomedical mechanisms behind the FLASH effect must be understood, demonstrating that it indeed reduces normal tissue toxicity, and its impact on medical personnel and instrumentation characterized.

For proton therapy, FLASH treatments may also prove beneficial by significantly increasing patient throughput, while improving treatment outcomes and reducing side effects.

Laser-driven accelerators. In the future, laser-driven accelerators may be an alternative to providing compact and cost-effective particle and photon sources. The accelerating field is a plasma, driven by intense laser pulses, and is typically several orders of magnitude larger than that of radiofrequency (RF) accelerators, while control of plasma media and intense laser pulses is very demanding. Therefore, many efforts have been directed towards developing compact, high-quality particle beams and radiation sources based on intense laser-plasma interactions, with the goal of paving the way for these new sources to be used in a variety of applications (Kojima, & Hata, 2023). Using a laser-driven ion source could mark a radical new approach, reducing the transport and delivery costs of the particle beam.

Artificial intelligence in the medical use of radiation. Artificial intelligence tools that can help with patient dose optimization and image-recognition and interpretation, automatic merging of images and digital mobile radiography, treatment planning, and response assessment, leading to more precise and individualized imaging and treatments are being introduced at high speed. However, the instantaneous image interpretation is the ultimate ambition of AI. Although AI technology has not yet achieved this ability in a broad sense, some examples of applications involve image segmentation, reconstruction, and disease registration. AI segmentation has the ability to automatically delineate structures and provide measurements such as organ volume or the surface area of a tumour. Taken a step further, these AI algorithms can hopefully be specialized to stage tumours and provide pre-interpreted read-outs such as scores for cancer staging. Automated segmentation and pre-interpreted read-outs may be maximally utilized in areas that have the most amount of data, such as screening imaging studies.

Theranostics. The concept or expression theranostics (alt. theragnostics) is defined as a combination of molecularly targeted imaging and therapy in which

imaging provides information that enables new or more effective therapies, with the purpose of delivering treatment to each health condition, focusing on tailoring the approach for each patient (Pini, Gelardi, & Sollini, 2022). In nuclear medicine, the same radiopharmaceutical is used both for finding cancer cells and delivering targeted radiation to kill those cells.

Radiomics. Radiomics refers to the extraction of quantitative features from medical images, thus converting the digital images into extractable data, which offer unique biological information that can enhance our understanding of disease processes and provide clinical decision support. (McCague et al., 2023). ("Omics" is a new term that has emerged to describe the field of large-scale data-rich biology). These features have the potential to uncover tumour patterns and characteristics that fail to be seen by the naked eye and converts them into useful data. The driving hypothesis is that these features reflect the underlying biology.

Dosimomics. Dosimomic means trying to extract a dose distribution in 3D using data characterization algorithms to be able to predict radiation therapy response, both in terms of tumor and side effects in the form of e.g. radiation pneumonitis (McCague et al., 2023).

RADIATION PROTECTION FOR PATIENTS. There have been concerns about the increase of dose to patients from some newer imaging technologies that go against the prevailing impression that the newer technologies provide less patient dose, e.g. (Rehani, & Nacouzi, 2020; IAEA, 2024).

The findings (IAEA, 2024) indicate that there are remaining challenges, such as: missing policies, lack of guidelines, appropriateness criteria and audit programmes in the new aspects of radiological imaging practices. The lack of human resources in the medical imaging fields, inadequate training, and obsolete educational curricula are also pointed out as problems for the implementation of the radiation protection requirements.

NEED FOR INDIVIDUAL OPTIMISATION IN DIAGNOSTICS. Individual patient dosimetry is well established in radiotherapy treatment planning where organ and tumour doses are patient specific. Recent developments that involve the application of imaging data, anthropomorphic phantoms and Monte Carlo calculations have led to real time treatment planning capability where tumour and organ doses are accurately assessed prior to an exposure. Such techniques are equally applicable to diagnostic image planning, whereby organ doses as well as accurate virtual images of normal anatomy can be produced for every patient examination.

Reporting of images by means of AI algorithms will mean that diagnostic accuracy as well as organ dose risk factors would be available for every patient, thus providing the basis for true optimisation (Moores, & Mattsson, 2023; Rehani, & Xu, 2024).

RADIATION SAFETY FOR PERSONNELL. The annual effective dose limit at occupational exposures is 20 mSv averaged over 5 years, with no single year exceeding 50 mSv (ICRP, 2007). The same limits apply to the equivalent dose to the lens of the eye (ICRP, 2012) while the equivalent dose limits for skin hands and feet is 500 mSv per year (ICRP, 2007). For members of the public the annual effective dose limit is 1 mSv per year on average.

ONGOING REVISION OF THE ICRP RECOMMENDATIONS. The current recommendations from the International Commission on Radiological Protection (ICRP) are from 2007 and ICRP has now finished the first phase of its work towards a review and revision of the recommendations. In the initial work, ICRP has identified some areas of research to support the System of radiological protection (Laurier et al., 2021). Views from inside ICRP (Clement et al., 2021) as well as from people outside ICRP (Rühm et al., 2022) have been asked for and the results have been reported and discussed.

When it comes to radiation risk assessments, the reviews point to the need for: 1) Better characterization of tissue reactions; 2) Stochastic effects and radiation detriment; 3) Individual response of humans to radiation; 4) Radiation effects on non-human biota. Other requirements are: 1) Dosimetry in emergency situations; 2) Identification of dosimetric targets in organs and tissues, as well as 3) Dosimetric targets and methodology for the protection of the environment; 4) Biokinetic models for human tissues; 5) Development and use of radiation technologies (medical use implications, veterinary practice implications, NORM, natural sources); 6) Ecosystem protection; 7) Research needs for the application of the system of radiological protection (AI, social science, stakeholder involvement, communication); 8) Ethics, and 9) Behavioral science.

EDUCATION, TRAINING AND RESEARCH. The development in medical imaging and radiation oncology as well as in medical physics and technology is fast and impressive. In order to take advantage of all the opportunities that are now opening up, increased efforts from medical physics are needed. This means that there is a need for sufficient staffing, an in-depth collaboration between personnel from different areas and good training of new employees in the form of basic education and training as well as active research. At its symposium in Vancouver in 2022 (Rühm et al., 2023), ICRP called for action to strengthen expertise in radiological protection worldwide through:

- National governments and funding agencies strengthening resources for radiological protection research allocated by governments and international organisations,
- National research laboratories and other institutions launching and sustaining long-term research programmes,
- Universities developing undergraduate and graduate job opportunities in radiation-related fields,
- Using plain language when interacting with the public and decision makers about radiological protection, and,
- Fostering general awareness of radiation and radiological protection through education and training of information multipliers.

Discussion and conclusions

The field of medical radiation physics is developing rapidly. The boundaries between medical physics specialties disappear in step with the increased use of imaging to guide the radiation therapy to obtain personalized and adaptive

treatments. The use of AI will be an essential part of the future. The increasing use of software and AI will change the role of medical physicists but the need for the skills of medical physicists will increase. They are also needed for the development of new technology and to ensure that the technology is understood and used correctly. It can be expected that the developments towards more and more individualised diagnostics and therapy will continue, which will require increased precision and accuracy in both radiotherapy and radiological diagnostics.

References

- Bäck, A., Nordström, F., Gustafsson, M., Götstedt, J., & Karlsson Hauer, A. (2017). Complexity metric based on fraction of penumbra dose – initial study. *Journal of Physics Conference Series*, 847, 012002. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/755/1/011001>
- Clement, C., Rühm, W., Harrison, J., Applegate, K., Cool, D., Larsson, C.-M., Cousins, C., Lochard, J., Bouffler, S., Cho, K., Kai, M., Laurier, D., Liu, S., & Romanov, S. (2021). Keeping the ICRP recommendations fit for purpose. *J. Radiol. Prot.*, 41, 1390–1409. <https://doi.org/10.1088/1361-6498/ac1611>
- Decazes, P., Hinault, P., Veresezan, O., Thureau, S., Gouel, P., & Vera, P. (2021). Trimodality PET/CT/MRI and radiotherapy: A mini-review. *Frontiers in Oncology*, 10, 614008. <https://doi.org/10.3389/fonc.2020.614008>
- Fromherz, M.R., & Makary, M.S. (2022). Artificial intelligence: Advances and new frontiers in medical imaging. *Artif Intell Med. Imaging*, 3(2), 33–41. <https://doi.org/10.35711/aimi.v3.i2.33>
- Giuliano, L., Franciosini, G., Palumbo, L., Aggar, L., Dutreix, M., Faillace, L., Favaudon, V., Felici, G., Galante, F., Mostacci, A., Migliorati, M., Pacitti, M., Patriarca, A., & Heinrich, S. (2023). Characterization of ultra-high-dose rate electron beams with electronflash linac. *Appl. Sci.*, 13, 631. <https://doi.org/10.3390/app13010631>
- Götstedt, J., Karlsson, A., & Bäck, A. (2023). Evaluation of measures related to dosimetric uncertainty of VMAT plans. *J. Appl. Clin. Med. Phys.*, 24(4), e13862.
- IAEA. (2024, Mar 4–6). *Technical Meeting on the Radiation Protection of Patients in the New Era of Medical Imaging*. Vienna, Austria. <https://www.iaea.org/events/evt2303935>
- ICRP. (2007). The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. *Annals of the ICRP: Publication103*. Ann. ICRP 37 (2-4). <https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20103>
- ICRP. (2012). *ICRP Statement on Tissue Reactions ICRP Publication 118*. Ann. ICRP 41(1/2). <https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20118>
- Kojima, S., & Hata, M. (2023). Laser-driven ion accelerator. In T. Shirai, T. Nishio, K. Sato (Eds.), *Advances in accelerators and medical physics* (pp. 343-352). AP B023.
- Koka, K., Verma, A., Dwarakanath, B.S., & Papineni, R.V.L. (2022). Technological advancements in external beam radiation therapy (EBRT): An indispensable tool for cancer treatment. *Cancer Management and Research*, 14, 1421–1429. <https://doi.org/10.2147/CMAR.S351744>
- Laurier, D., Rühm, W., Paquet, F., Applegate, K., Cool, D., & Clement, C. (2021, Oct 17). Areas of research to support the system of radiological protection. (On behalf of the ICRP). *Radiat. Environ. Biophys.*, 60, 519–530. <https://doi.org/10.1007/s00411-021-00947-1>
- Liu, X., Li, Z., & Yin, Y. (2023). Clinical application of MR-linac in tumor radiotherapy: A systematic review. *Radiation Oncology*, 18(1), 52. <https://doi.org/10.1186/s13014-023-02221-8>
- Mattsson, S., & Adlienè, D. (2013). Current developments and future of medical physics. Challenges and opportunities. In: *III International Workshop Medical Physics – the current status, problems, the way of development. Innovation technologies*. Kiev, Ukraine.
- Mattsson, S., Adlienè, D. & Laurikaitienè, J. (2023). Current trends in medical physics. In D. Adlienè (Ed.), *Medical Physics in the Baltic States: Proceedings of the 16th International Conference on Medical Physics* (pp. 3–8.). Kaunas University of Technology.

McCague, C., Ramlee, S., Reinius, M., Selby, I., Hulse, D., Piyatissa, P., Bura, V., Crispin-Ortuzar, M., Sala, E., & Woitek, R. (2023). Introduction to radiomics for a clinical audience. *Review. Clinical Radiology*, 78, 83–98.

Moore, M., & Mattsson, S. (2023). *Comments on the System of Radiological Protection*. https://www.icrp.org/admin/On-Demand/OD53_TheFutureOfRP_Moore-Mattsson.pdf

Nyholm, T., & Jonsson, J. (2015). Technical aspects of MR-only radiotherapy. *MAGNETOM Flash*, 2, 78–83. www.siemens.com/magnetom-world

Pini, C., Gelardi, F., & Sollini, M. (2022). Present and future of target therapies and theranostics: refining traditions and exploring new frontiers – Highlights from Annals of Nuclear Medicine. Editorial. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, 49, 3613–3621. <https://doi.org/10.1007/s00259-022-05921-7>

Pratt, E.C., Lopez-Montes, A., Volpe, A., Crowley, M.J., Carter, L.M., Mittal, V., Pillarsetty, N., Ponomarev, V., Udías, J.M., Grimm, J., & Herraiz, J.L. (2023). Simultaneous quantitative imaging of two PET radiotracers via the detection of positron–electron annihilation and prompt gamma emissions. *Nature Biomedical Engineering*, 7, 1028–1039. <https://doi.org/10.1038/s41551-023-01060-y>

Rehani, M. M., & Nacouzi, D. (2020). Higher patient doses through X-ray imaging procedures. *Physica Medica*, 79, 80–86.

Rehani, M., & Xu, X.G. (2024). Dose, dose, dose, but where is the patient dose? *Rad. Prot. Dosim.*, 200(10), 945–955.

Rühm, W., Clement, C., Cool, D., Laurier, D., Bochud, F., Applegate, K., Schneider, T., Bouffler, S., Cho, K., Hirth, G., Kai, M., Liu, S., Romanov, S., & Wojcik, A. (2022). Summary of the 2021 workshop on the future of radiological protection. *J. Radiol. Prot.*, 42, 023002. <https://doi.org/10.1088/1361-6498/ac670e>

Rühm, W., Cho, K., Larsson, C.-M., Wojcik, A., Clement, C., Applegate, K., Bochud, F., Bouffler, S., Cool, D., Hirth, G., Kai, M., Laurier, D., Liu, S., Romanov, S., & Schneider, T. (2023). Vancouver call for action to strengthen expertise in radiological protection worldwide. *Radiation and Environmental Biophysics*, 62, 175–180. <https://doi.org/10.1007/s00411-023-01024-5>

Zhang, W., Oraiqat, I., Litzenberg, D., Chang, K.-W., Hadley, S., Sunbul, N.B., Matuszak, M.M., Tichacek, C.J., Moros, E.G., Carson, P.L., Cuneo, K.C., Wang, X., & El Naqa, I. (2023). Real-time, volumetric imaging of radiation dose delivery deep into the liver during cancer treatment. *Nature Biotechnology*, 41, 1160–1167. <https://doi.org/10.1038/s41587-022-01593-8>

Отримано редакцією збірника / Received: 30.07.24

Прорецензовано / Revised: 15.08.24

Схвалено до друку / Accepted: 01.10.24

Сьорен МАТТССОН, д-р філософії, проф.

ORCID ID: 0000-0002-6443-1913

e-mail: soren.mattsson@med.lu.se

Лундський університет, Університетська лікарня Сконе, Мальме, Швеція

СУЧАСНИЙ РОЗВИТОК МЕДИЧНОЇ РАДІАЦІЙНОЇ ФІЗИКИ ТА РАДІАЦІЙНОГО ЗАХИСТУ

Розглянуто сучасні тенденції та перспективні напрями розвитку діагностики і терапії з використанням іонізуючого випромінювання. Узагальнено останні досягнення медичної фізики, які впроваджені у променевій терапії, діагностичній радіології, ядерній медицині, МРТ та радіаційній безпеці. Сьогодні велику увагу спрямовано на розвиток створення умов для індивідуальної діагностики та терапії пацієнта, що вимагає підвищеної коректності як у радіологічній діагностиці, так і в променевій терапії. До сфери активного розвитку належить використання штучного інтелекту (ШІ) для покращення діагностики і терапії, тераностики, радіоміки та дозиміки. Усі ці підходи є частиною так званої прецизійної або

персоналізованої медицини. Також коментується поточний перегляд рекомендацій МКРЗ щодо радіаційного захисту. Для оцінювання дози та ризику в діагностичних додатках (рентгенівська томографія, КТ, інтервенційна радіологія, діагностична ядерна медицина) пропонується перехід від середніх фантомів, методів розрахунку та показників ризику на основі популяції до методів розрахунку, фантомів та показників ризику для кожного пацієнта (як це робиться в променевій терапії).

Ключові слова: *променева терапія, діагностика, дозиметрія, безпека, КТ, ПЕТ, MR-Linac, III.*

Член програмного комітету С. Маттссон заявляє про відсутність конфлікту інтересів та невтручання в процес оцінювання цієї статті відповідно до міжнародних стандартів публікаційної етики. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The member of the Program committee S. Mattsson declares no conflict of interest and has not interfered in the evaluation process of this article, in accordance with international publication ethics standards. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

UDC 616-053.2:615.849.11

DOI: <https://doi.org/10.17721/3041-1491/2024.11-10>

Birutė GRICIENĖ^{1,2}, PhD, Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0002-9224-6512
e-mail: birute.griciene@santa.lt

Leonid KRYNKE¹
ORCID ID: 0009-0006-1580-6981
e-mail: leonid.krynke@santa.lt

Milda BAREIKĖ¹
ORCID ID: 0009-0001-7676-4125
e-mail: milda.petkelyte@santa.lt

Antonio JREIJE¹, PhD Student
ORCID ID: 0000-0001-9774-9461
e-mail: antonio.jreije@santa.lt

Kirill SKOVORODKO¹, PhD
ORCID ID: 0000-0001-7517-4767
e-mail: kirill.skov@gmail.com

¹Vilnius University Hospital Santaros Klinikos, Vilnius, Lithuania

²Vilnius University, Vilnius, Lithuania

TOWARDS GOOD PRACTICE IN PATIENT DOSE MANAGEMENT IN PAEDIATRICRADIOLOGY

Introduction. *Diagnostic and interventional X-rays represent a substantial portion of radiation exposure from artificial sources, with pediatric patients being particularly vulnerable due to their increased sensitivity to ionizing radiation. This study aimed at assessing radiation exposure in children undergoing interventional radiology (IR) procedures and computer tomography (CT) scans at Vilnius University Hospital Santaros Klinikos (VUHSK), Lithuania's second-largest hospital, and to establish local Diagnostic Reference Levels (DRLs) to ensure optimized dose management.*

Methods. *Data from pediatric IR and CT procedures conducted between 2021 and 2023 were analyzed, with local DRLs set at the 75th percentile of dose-related parameters such as Dose Area Product (DAP), Dose Length Product (DLP), Entrance Surface Dose (ESD), and Fluoroscopy Time (FT).*

Results. *The findings reveal that pediatric CT doses at VUHSK are consistently below European DRLs, with reductions of up to 25 %, largely due to over a decade of ongoing patient exposure assessment and protocol optimization. Optimization efforts included adjustments to acquisition parameters. Despite the challenges of establishing separate local DRLs for each IR procedure due to limited sample sizes, age-based DRLs were developed to address the absence of routinely recorded patient weight.*

Conclusions. *This study highlights the importance of continuous research in dose optimization and the need for local DRLs, especially for pediatric interventional radiology. The findings demonstrate that individualized optimization is crucial for maintaining low radiation doses without compromising diagnostic quality, and that establishing local DRLs is an essential step in ensuring patient safety.*

Keywords: *DRL's, Radiation patient dose, Patient dose assessment, Pediatric Computed Tomography, Pediatric interventional radiology, Pediatric radiology.*

Introduction

Diagnostic and interventional X-rays account for the largest portion of radiation exposure from artificial sources to the general population. Over the past two decades, the number of radiological examinations has risen significantly, leading to increased radiation exposure among patients (*United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*, UNSCEAR) (UNSCEAR 2020/2021, 2021). Children are especially vulnerable to the effects of ionizing radiation due to their developing tissues and longer life expectancy, which increases their lifetime risk of cancer. As a result, it is crucial to carefully monitor and optimize radiation exposure during pediatric radiology, particularly in high-dose procedures including interventional radiology and computer tomography scans (European Council Directive 2013/59/Euratom, 2013). The heightened sensitivity of children to ionizing radiation makes dose management a priority in ensuring the safety and efficacy of diagnostic imaging.

Dose optimization strategies in pediatric radiology are essential for minimizing radiation exposure while maintaining diagnostic accuracy. These strategies include using age- and size-specific protocols, employing advanced imaging technologies that reduce dose (such as automatic exposure control and iterative reconstruction), and ensuring that exams are clinically justified. Additionally, careful collimation, and limiting repeat scans can further enhance dose reduction efforts. The integration of these methods ensures that each pediatric patient receives the lowest possible radiation dose while obtaining high-quality diagnostic images (European Council Directive 2013/59/Euratom, 2013). Moreover, Diagnostic Reference Levels (DRLs) have been introduced as an invaluable tool for monitoring and optimizing patient radiation exposure. DRLs are not strict dose limits but rather upper reference values that guide healthcare providers in optimizing patient doses without compromising diagnostic image quality (European Council Directive 2013/59/Euratom, 2013). By comparing administered doses to established DRLs, healthcare professionals can make informed decisions to reduce unnecessary radiation exposure, thus mitigating the risks of potential adverse effects.

However, effective dose monitoring remains a challenge for many healthcare facilities. Despite the critical importance of managing pediatric radiation exposure, only a limited number of hospitals have published comprehensive data on patient dose evaluations and the establishment of local DRLs. Many countries still lack DRLs for a basic set of common pediatric examinations, leaving gaps in radiation protection practices. In Lithuania, for example, despite legal requirements, there is an absence of national DRLs addressing Pediatric Interventional Radiology (PIR) procedures. This lack of national guidelines further complicates efforts to standardize dose optimization and safeguard young patients from unnecessary radiation exposure.

At Vilnius University Hospital Santaros Klinikos (VUHSK), Lithuania's second-largest hospital, a wide array of diagnostic, interventional, and nuclear medicine procedures are performed annually. Given the significant volume of pediatric radiology cases at VUHSK, implementing effective dose management strategies is essential to safeguard the health of pediatric patients.

The aim of this study was to evaluate radiation exposure doses in children undergoing interventional radiology procedures and CT investigations, set up local DRLs and check compliance with national diagnostic reference levels (DRLs) when available.

Methods

Data collection was conducted for computed tomography (CT) and interventional radiology (IR) procedures performed between 2021 and 2023. Retrospective CT datasets from head, thoracic, and abdominal-pelvic CT scans performed on children aged 0–17 years were analyzed. CT dose data was categorized by weight interval for thoracic and abdominal-pelvic procedures into the following groups: 5–14 kg, 15–29 kg, 30–49 kg, and 50–79 kg. While for head CT, data was grouped into age groups following two different intervals: < 1 , $1 - < 5$, $5 - < 10$, $10 - < 15$ and $15 - < 18$ years as well as $0 - < 3$ month, $3 \text{ month} - < 1 \text{ year}$, $1 - < 6 \text{ year}$, $6 - < 18 \text{ years}$.

IR procedures were carried out using two angiography systems: the Shimadzu Trinias B12 and the Philips Allura Xper FD20. The following IR procedures were evaluated: Patent Ductus Arteriosus (PDA) closure (32 %), Pulmonary Artery (PA) balloon angioplasty and/or stenting (21 %), Coarctation of the Aorta (CoA) balloon angioplasty and/or stenting (19 %), Atrial Septal Defect (ASD) closure (14 %), Transcatheter Pulmonary Valve Replacement (TPVR) (5 %), Percutaneous Balloon Aortic Valvuloplasty (BAV) (5 %), and Percutaneous Balloon Pulmonary Valvuloplasty (BPV) (4 %). The dose data for these procedures were grouped by patient age into the following intervals: $< 1 \text{ year}$, $1 - < 5 \text{ years}$, $5 - < 10 \text{ years}$, and $10 - < 18 \text{ years}$.

Local DRLs were established as the 75th percentile of the distribution of dose-related parameters, depending on the type of diagnostic procedure. These parameters included Dose Area Product (DAP), Dose Length Product (DLP), Entrance Surface Dose (ESD), and Fluoroscopy Time (FT), in accordance with recommendations from the European Commission and the Radiation Protection Centre in Lithuania.

Results

It is recommended to compare established local DRLs against both national and European DRLs to assess the level of patient radiation protection at each hospital. However, Lithuania DRLs are not currently established for all radiological procedures included in this study, such as interventional procedures. While for some procedures, like thorax and pelvis CT, Lithuanian DRLs are categorized by age groups rather than weight groups, further complicating direct comparisons. Despite these challenges, CT dose for head, thorax and pelvis-abdoman procedures were established (Table 1) and the data indicates that pediatric CT doses are generally low, with most falling well below European DRLs (Fig. 1) (European Commission, 2018).

The results can be attributed to over a decade of continuous efforts in patient exposure assessment and dose optimization at the hospital. Optimization measures included adjusting acquisition protocols for various procedures, such as reducing the X-ray source voltage, adjusting tube current time product (mAs), modifying pitch, and implementing iterative reconstruction techniques. For example, in routine CT head exams and thorax imaging for deformities, the X-ray tube voltage was reduced from 120 kVp to 100 kVp, and the tube current time product was optimized for each specific indication. As a result of these efforts, CT doses have steadily decreased, with head CT doses for the youngest patients reduced by approximately threefold

since 2010. Additionally, continuous training of practitioners and technicians in radiation protection has been instrumental in achieving these dose reductions and ensuring ongoing optimization of patient safety.

Table 1
CT doses reported as maximum, median, 3rd quartile values of DLP (mGy·cm)

Weightgroup	Numberofscans	Max	Median	Q3
Head				
<1	27	–	119	158
1–<5	55	–	215	265
5–<10	55	–	232	280
10–<15	51	–	275	327
15–<18	25	–	297	335
0–<3m	6	–	111	117
3m–<1y	21	–	140	175
1–<6y	75	–	228	270
6–<18y	111	–	269	323
Thorax				
5–14kg	13	58.7	34.7	38
15–29kg	43	91.4	49.3	60
30–49kg	71	163.3	85.9	107
50–79kg	75	420.1	139.1	153
Abdomen–Pelvis				
5–14kg	21	100.6	51.5	80
15–29kg	33	239.7	131.6	159
30–49kg	21	358.5	97.7	201
50–79kg	30	595.5	261.8	353

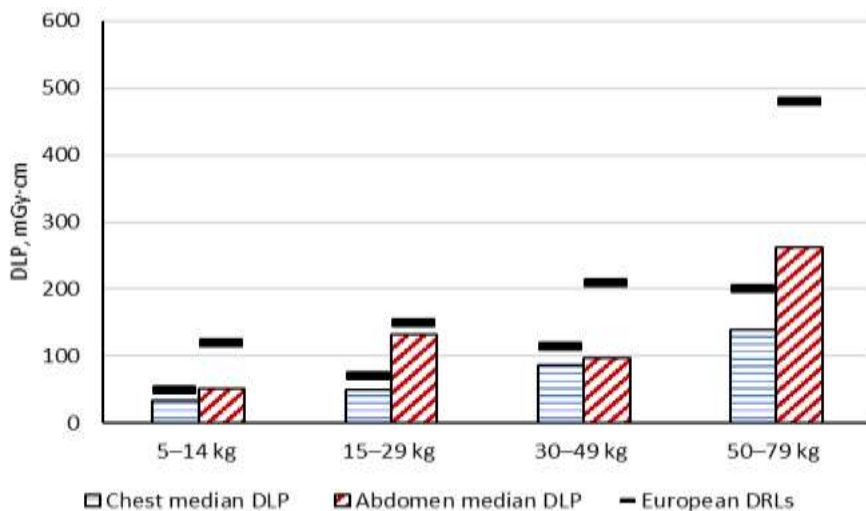


Fig. 1. Comparison of median DLPs with European DRLs

Due to limited number of pediatric IR procedures, it was challenging to establish separate local DRLs for each procedure since European Guidelines on DRL for pediatric imaging recommend a sample of ≥ 20 patients. Nevertheless, this issue is common across healthcare facilities and countries, contributing to the scarcity of published DRL data in pediatric interventional radiology and cardiology, making comparisons difficult (Fig. 1). To address this, all available data were combined to obtain a more representative sample. Radiation dose-related parameter reported as median, minimum and maximum value of ESD (mGy), DAP (Gy. cm²) and FT (min) for each procedure are summarized in Table 2. In this study, pediatric IR DRLs were stratified by age rather than weight, as patient weight and height are not routinely recorded at the hospital. It should be noted that ICRP Publication 135 recommend categorizing pediatric DRL by weight, while suggesting the use of age-based categorization as an acceptable alternative when weight data are unavailable (Vaño et al., 2017).

Table 2

**Dose indicators for combined IR procedures stated
as the median, minimum and maximum value**

Procedures	Patient Number	ESD(mGy)			DAP(Gy.cm ²)			FT(min)		
		Median	Min	Max	Median	Min	Max	Median	Min	Max
Total	168	66.21	3.17	3341.6	4.40	0.26	326.0	8.25	1.90	79.2
<1	35	31.00	9.30	415.1	1.35	0.26	17.3	9.09	2.75	79.2
1-<5	59	72.40	11.55	526.8	4.57	0.70	29.3	10.12	1.90	58.9
5-<10	32	59.12	9.50	224.8	3.70	0.58	12.8	7.18	2.21	34.1
10-<18	42	241.19	3.17	3341.6	13.00	0.30	326.0	7.46	2.20	68.4

Discussion and conclusions

Setting DRL can be a complex and time-consuming process, as it requires covering a wide range of diagnostic procedures across different hospital departments. At the European level, there are relatively few publications on pediatric DRLs, highlighting the pressing need for the establishment of national and local DRLs. These benchmarks are essential for identifying inconsistencies in radiation exposure between different equipment and ensuring that patient doses are kept as low as reasonably achievable. The radiation exposure values obtained from CT imaging in this study showed that optimization practices resulted in doses up to 25 % lower than European DRLs. This underscores the importance of individualized optimization for each piece of equipment and procedure type. For interventional radiology, the results revealed greater variation between procedures due to differences in case complexity and physicians experience, thus further complicating the task of dose monitoring and optimization. Overall, our findings demonstrate the critical role of continuous research in patient dose optimization. Establishing new national DRLs for Lithuania and developing local DRLs within hospitals should be an ongoing effort to ensure patient safety and maintain consistent radiation protection practices.

Authors' contribution. All authors participated in the study design, original text writing and performing the measurements. Birutė Gričienė is the first corresponding author, she was responsible for methodology, data analysis, writing and reviewing the manuscript. Leonid Krynke was responsible for the methodology, data analysis, writing the manuscript. Milda Bareikė contributed to the methodology, conceptualization, formal analysis and writing the manuscript. Antonio Jreije participated in data interpretation as well as writing the manuscript. Kirill Skovorodko edited the manuscript and provided useful comments and suggestions. All authors read and approved the final version of the manuscript.

References

European Commission. (2018). European Guidelines on Diagnostic Reference Levels for Paediatric Imaging. *Radiation Protection*, 185. http://www.eurosafeimaging.org/wp/wpcontent/uploads/2018/09/rp_185.pdf

European Council Directive 2013/59/Euratom. (2013). On basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionizing radiation and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom. OJ of the EU. 2014; L13; 57: 1–73.

UNSCEAR 2020/2021. (2021). Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. *Report to general assembly*, Vol. I.

Vañó, E., Miller, D.L., Martin, C.J. et al. (2017). ICRP Publication 135: Diagnostic Reference Levels in Medical Imaging. *Ann ICRP*, 46(1), 1–144. <https://doi.org/10.1177/0146645317717209>

Отримано редакцією збірника / Received: 11.09.24

Прорецензовано / Revised: 25.09.24

Схвалено до друку / Accepted: 23.10.24

Біруте ГРІЧІЕНЕ^{1,2}, д-р філософії, доц.

ORCID ID: 0000-0002-9224-6512

e-mail: birute.griciene@santa.lt

Леонід КРИНКЕ¹

ORCID ID: 0009-0006-1580-6981

e-mail: leonid.krynke@santa.lt

Мілда БАРЕЙКЕ¹

ORCID ID: 0009-0001-7676-4125

e-mail: milda.petkelyte@santa.lt

Антоніо ЙРЕЙЄ¹, асп.

ORCID ID: 0000-0001-9774-9461

e-mail: antonio.jreije@santa.lt

Кірілл СКОВОРОДКО¹

ORCID ID: 0000-0001-7517-4767

e-mail: kirill.skov@gmail.com

¹Лікарня Вільнюського університету Santaros Klinikos, Вільнюс, Литва

²Вільнюський університет, Вільнюс, Литва

ДО ПЕРЕВІРЕНОЇ ПРАКТИКИ УПРАВЛІННЯ ДОЗАМИ ОПРОМІНЕННЯ ПАЦІЄНТІВ У ПЕДІАТРИЧНІЙ РАДІОЛОГІЇ

Вступ. Рентгенівське опромінення під час діагностичних та інтервенційних процедур становить значну частину радіаційного опромінення від штучних джерел, при цьому педіатричні пацієнти є особливо вразливими через їхню

підвищену чутливість до іонізуючого випромінювання. Це дослідження було спрямоване на оцінювання радіаційного опромінення дітей, які проходять процедури інтервенційної радіології (ІР) та комп'ютерну томографію (КТ) у лікарні Вільнюського університету Сантарос Клінікос (ЛВУСК), яка є другою за величиною лікарнею Литви, а також встановити місцеві діагностичні референтні рівні (ДРР) для забезпечення оптимізації дози.

Методи. Було проаналізовано дані педіатричних ІР та КТ процедур, проведених з 2021 по 2023 роки, з місцевими ДРР, встановленими на 75-му процентилі параметрів, пов'язаних з дозою, таких як добуток площа-доза, добуток довжина-доза, вхідна поверхнева доза і час флюороскопії.

Результати. Отримані результати показують, що педіатричні дози КТ у ЛВУСК стабільно нижчі за європейські ДРР, зі зниженням до 25 %, головним чином через десятиліття постійної оцінки опромінення пацієнтів та оптимізації протоколу. Зусилля з оптимізації включали коригування параметрів накопичення. Незважаючи на труднощі встановлення окремих місцевих ДРР для кожної процедури ІР через обмежені розміри вибірки, були розроблені ДРР на основі віку, що усунило відсутність регулярних записів ваги пацієнта.

Висновки. Це дослідження вказує на важливість постійних досліджень з оптимізації дози та потребу в локальних ДРР, особливо для дитячої інтервенційної радіології. Результати демонструють, що індивідуальна оптимізація має вирішальне значення для забезпечення низьких доз опромінення без шкоди для якості діагностики, а встановлення локальних ДРР є важливим кроком у забезпеченні безпеки пацієнтів.

Ключові слова: DRL, доза опромінення пацієнта, оцінювання дози пацієнта, дитяча комп'ютерна томографія, дитяча інтервенційна радіологія, дитяча радіологія.

Автори Б. Гріцієне, Л. Кринке, М. Барейке, А. Йреїс та К. Сковородко заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors B. Gricienė, L. Krynke, M. Bareikė, A. Jreije and K. Skovorodko declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

Kirill SKOVORODKO¹, PhD
ORCID ID: 0000-0001-7517-4767
e-mail: kirill.skov@gmail.com

Antonio JREIJE¹, PhD Student
ORCID ID: 0000-0001-9774-9461
e-mail: antonio.jreije@santa.lt

Inga ANDRIULEVIČIŪTĖ¹
ORCID ID: 0009-0006-1580-6981
e-mail: inga.andriuleviciute@gmail.com

Leonid KRYNKE¹
ORCID ID: 0009-0006-1580-6981
e-mail: leonid.krynke@santa.lt

Birutė GRICIENĖ^{1,2}, PhD, Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0002-9224-6512
e-mail: birute.griciene@santa.lt

¹Vilnius University Hospital Santaros Klinikos, Vilnius, Lithuania

²Vilnius University, Vilnius, Lithuania

A FOLLOW-UP STUDY ON THE LEAD EQUIVALENCE AND INTEGRITY OF PERSONAL PROTECTIVE EQUIPMENT USED IN CLINICAL PRACTICE

Introduction. *Personal radiation protective equipment (PRPE) means such vests and skirts, aprons, thyroid collars and other means reduce radiation exposure of personnel working with X-rays and gamma ray sources. The composition of PRPE worn by X-ray personnel to shield against secondary radiation is changing. Lead is being replaced by either lead-free or composite (lead with other high atomic numbered elements) materials. In clinical practice, PRPEs with different lead equivalents are used. PRPE from lead or lead-equivalent material (LEM) are essential in providing necessary shielding from secondary radiation exposure to workers.*

Methods. *Quality assessment of the PRPE was performed evaluating integrity and lead equivalence of more than 800 units, 0.25, 0.35, 0.5 and 1 mm LEM provided by ten manufacturers in the period 2022–2024.*

Results. *Siemens Luminos dRF MAX 3D radiography, Philips Incisive CT computed tomography, Philips BV Endura mobile C-arm, and FLOWD 8020 mobile protective clothing testing X-ray units were used for obtaining images of PRPE for checking the integrity and lead equivalence. A calibrated solid-state meter Piranha R&F/M 657 with RTI Dose Probe was used for checking the radiation attenuation. In order to check the integrity, PRPE were categorized into four categories: I (good quality), II (small cracks), III (large cracks not in critical areas and smaller than 5 cm²), IV (very large cracks, cracks in critical areas, bigger than 5 cm²). PRPE lead equivalence deviations were analysed and grouped into three categories: DI (less than 5 %), DII (less than 10 %), DIII (more than 10 %).*

Conclusions. *The results of the integrity tests showed that about 85 % of the PRPE were in good quality. The analysis of lead equivalence deviations showed that about 76 % of the PRPE met the criteria for category DI. The aim of the study was to evaluate the lead equivalence and the integrity of the PRPE used in clinical practice with different screening methods.*

Keywords: *personal radiation protective equipment, lead protective equipment, radiation protection.*

© Skovorodko Kirill, Jreije Antonio, Andriulevičiūtė Inga,
Krynke Leonid, Gricienė Birutė, 2024

Introduction

The total number of diagnostic and therapeutic procedures worldwide is constantly increasing (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR) (UNSCEAR, 2021) and it may result in higher radiation exposure for interventional radiologists and other related medical staff. Personnel in departments equipped with X-ray modalities are required to wear personal radiation protective equipment (PRPE) to ensure adequate shielding from scattered radiation. Typically, PRPE including lead aprons, vests, skirts, and thyroid shields are made using lead powder-loaded sheets or lead-oxide on vinyl (McCaffrey et al., 2007; Peters et al., 2017). A typical 0.25 mm lead-impregnated apron weighs approximately 3.25 kg, while a 0.5 mm apron weighs around 4.95 kg, with some reaching up to 7 kg (Kim, Choi, & Jeon 2016; Warren-Forward et al., 2007; Zuguchi et al., 2008). This substantial weight can hinder efficient movement and performance of tasks, and prolonged use can lead to musculoskeletal pain and injuries, particularly affecting the spine (Goldstein, 2015; Klein, 2009; Moore et al., 1992). Due to these weight issues as well as environmental concerns, there has been a shift towards lightweight, non-lead or lead-composite materials incorporating elements such as cadmium, tin, iodine, barium, antimony, or tungsten (Aral, Duch, & Ardanuy, 2020; Klein et al., 2018; Yaffe et al., 1991). These composite materials offer the same level of attenuation as traditional lead aprons for X-ray energies ranging from 50 kVp to 125 kVp, but with a significant weight reduction of 20–30 % (Webster, 1966).

To assess the viability of employing PRPE, many hospitals and other organizations use W. Stam and M. Pillay (Stam, & Pillay, 2008) method which gives criteria to aid in determining when lead aprons should be discarded. The rejection criteria proposed by Lambert and McKeon can also be used (Lambert, & McKeon, 2001). However, there is a lack of uniform, specific, and actionable guidelines which can lead to inconsistencies in inspection practices. Therefore, institutions and hospitals develop their own procedures with regulation, such as rejection criteria, based on the literature and frequency of quality checks (Kellens et al., 2022).

It is important to test the integrity and the lead equivalence of every newly purchased apron before it is used by personnel. Common defects to look for include material non-uniformity, cracks, tailoring flaws, and discrepancies in the specified lead equivalence provided by manufacturers. Moreover, during usage, aprons are subject to normal wear and tear, as well as occasional mishandling or improper storage. PRPE can be inadvertently damaged when folded or dropped, causing sharp bends in the vinyl that result in deterioration, such as cracks or holes in the shielding material. Periodic inspections of PRPE are essential because the health and safety of both X-ray workers and patients rely on the integrity of this equipment. The aim of the study was to evaluate the lead equivalence and the integrity of the PRPE used in clinical practice with different screening methods.

Methods

General information: Quality assessment of 0.25, 0.35, 0.5 and 1 mm lead and lead-free PRPE from thirteen manufacturers was performed. X-ray units were used

for inspecting the integrity and lead equivalence: digital radiography Siemens Luminos dRF MAX 3D, computed tomography Philips Incisive CT, mobile C-arm Philips BV Endura and mobile apron screening system FLOWD 8020. The protocol parameters and modes used for the inspections are shown in Table 1. A calibrated solid-state meter Piranha R&F/M 657 with RTI Dose Probe was used for checking the radiation attenuation.

Table 1

The protocol parameters and modes used for inspections of PRPE

Manufacturer	Protocol	kV	mA	Field of view size	The attenuation evaluation method
Siemens Luminos dRF MAX 3D	Standard radiography and fluoroscopy	100	100	420 mm × 420 mm (radiography), 290 mm (fluoroscopy)	Solid-state meter; pixel values
Philips Incisive CT	CT scout view	100	50	500 mm	HU (Hounsfield units)
Philips BV Endura	Fluoroscopy	100	20	210 mm	Solid-state meter
FLOWD 8020	Standard	80–100	1,2–1,0	240 x 870 mm	Automatic

PRPE categorization and rejection criteria: In order to check the integrity, PRPE were categorized into four categories: I (good quality), II (small cracks), III (large cracks not in critical areas and smaller than 5 cm²), IV (very large cracks, cracks in critical areas, bigger than 5 cm²). PRPE lead equivalence deviations were analysed and grouped into three categories: DI (less than 5 %), DII (less than 10 %), DIII (more than 10 %). Pieces with a total defect area bigger than 5 cm² (IV category) in critical areas were rejected. An internal institutional rule allows to reject the PRPE that have breaks, tears and cracks in non-repairable areas.

Image and statistical analysis: Images were processed using ImageJ program packages. Data analysis was performed using "Microsoft EXCEL 2019" and "SPSS Statistics 2019" software.

Results

The inspection of PRPE is a multifaceted process essential for ensuring that protective gear continues to offer adequate protection against ionizing radiation. More than 800 units of PRPE were evaluated over two years. In particular, 278 thyroid collars, 194 vests, 190 skirts, 58 customized covering means, and 89 aprons were inspected. The results of the integrity tests showed that about 85.3 % of the PRPE were of good quality while the remaining had tears/cracks and were assigned to category II (9.8 %), III (3.8 %), and IV (1.1 %), respectively. The analysis of lead equivalence deviations revealed that 75.6 % of the PRPE met the criteria for category DI, 11.9 % for category

DII, while 12.5 % of the measured PRPE exceeded the lead equivalence amount specified by the manufacturers by more than 10 %. Detail results of PRPE integrity and lead equivalence are presented in Table 2 and Table 3. Moreover, the results indicated that all the X-ray units used for investigating the integrity and lead equivalency of PRPE had similar accuracy and could be used interchangeably. However, specialized apron screening system stood out for its practicality, large fields of view, automatic inspection protocol generation, reduced scan times, and close to the background dose rate exposure near the operating machine. Moreover, on-site PRPE inspections allow to minimize the disrupting the clinical work of departments where such PRPE are used. Depending on the PRPE units' number, the inspection of protective equipment takes about a couple of hours (including the handling and transportation to the inspection place). The risk of additional contamination of PRPE is also reduced, as inspections take place on the hospital's territory.

Table 2

Results of PRPE integrity deviation evaluations

Categories of PRPE integrity	Number of PRPE units	Percentage (%)
Category I (good quality)	690	85,3
Category II (small cracks)	79	9,8
Category III (large cracks not in critical areas and smaller than 5 cm ²)	31	3,8
Category IV (very large cracks, cracks in critical areas, bigger than 5 cm ²)	9	1,1

Table 3

Results of PRPE lead equivalence deviation evaluations

Categories of PRPE integrity	Number of PRPE units	Percentage (%)
Category DI (less than 5 %)	612	75.6
Category DII (from 5 to 10 %)	96	11.9
Category DIII (more than 10 %)	101	12.5

Since the PRPEs were first visually inspected, damages, tears and cracks were found in most cases during these inspections. During usage, aprons are subject to normal wear and tear, as well as occasional mishandling or improper storage. This included inspection of buckles, loops and magnets, as well as inspection of the outer fabric. After this process, the PRPE were validated by inspection methods presented in Table 4. These techniques are essential for identifying cracks, voids, or inconsistencies within the protective material not visible to the naked eye. In addition, advanced inspection methods, as shown in Figure 1, play a crucial role in identifying hidden flaws that could compromise the protective function of the equipment, ensuring that only safe and effective PRPE remain in use.

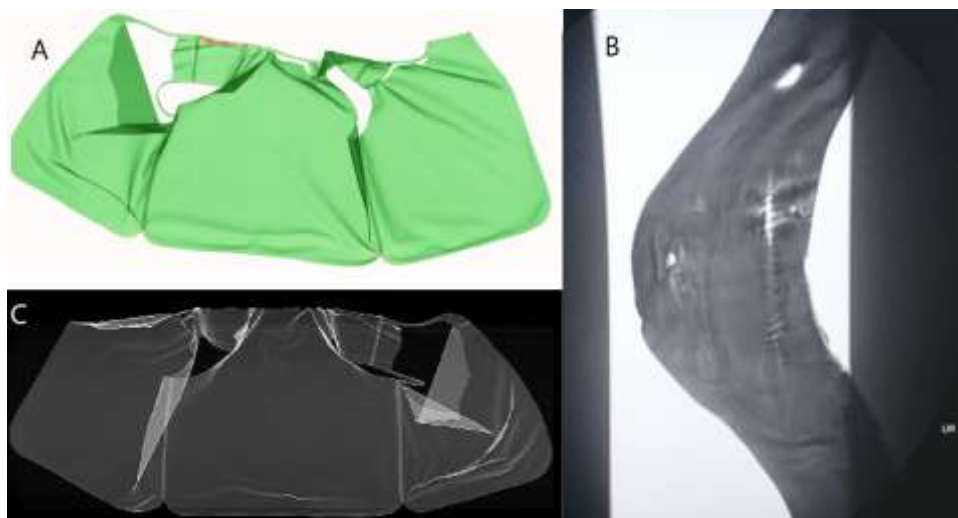


Fig. 1 Examples of cracks or tears in PRPE
(A – FLOWD 8020, B – fluoroscopy, C – CT images)

Table 4

Comparison of equipment use in PRPE inspection

Equipment	Inspection parameters	Advantages	Disadvantages
Computed Tomography	• Perform a topogram scan (scout view). • Always check the pixel resolution of the scout view, manufacturers have different pixel resolutions for the scout/planning view which can be lower than the stated scan resolution. In some cases, it reduces as the length of the scout view increases. A pixel resolution of 5mm may not demonstrate a tear < 5 mm. • Recommended exposure – 80 to 100 kV and a low mA setting to help protect the tube and lower the dose to the inspector.	• Eliminate the need for inspector presence in the X-ray room during exposure, thereby reducing personal dose exposure. • Speed of scans. • Having a permanent digital record of each apron. • The possibility of performing multiple aprons with a single scan. • No need of the calibrated solid-state meter.	• Unavailability of a scanner to perform testing as most facilities that have very busy schedules. • The scanning table might be too narrow and thus care must be taken to spread the apron on the table in a proper way. • CT resources (as the tube and detectors) are used. • HU must be analysed.

Equipment	Inspection parameters	Advantages	Disadvantages
Stationary X-ray and fluoroscopy	• Use fluoroscope's manual settings and low technique factors (e.g. 70–100 kVp). • Use remote controllable fluoroscopy unit. • Use maximum focus-film or focus-detector distance • Take a radiograph with manual settings and low exposure parameters (e.g. 70–100 kVp).	• Easily accessible in the hospitals. • Selection of different parameters.	• Additional radiation dose to the inspector (if there is no remote control). • Many fluoroscopy systems only work within pre-programmed protocols making it challenging to set optimised exposure factors for crack detection.
C-arm	• Use fluoroscope mode settings and low technique factors (e.g. 70-100 kVp).	• Easily accessible in the hospitals.	• Additional radiation dose to the inspector. • Small field of view. • Usually located in the operating room.
PRPE screening systems	• Direct performing of the PRPE inspection.	• Reduce the need to have dedicated personnel and equipment. • Have larger fields of view and much lower scan times. • Speed of scans. • The possibility of performing multiple units with a single scan. • No need of the calibrated solid-state meter. • Produce reports and might include an PRPE management system.	• Must be purchased separately.

Discussion and conclusions

Personal radiation protective equipment is crucial for the safety of hospital workers, and regular inspections are essential to ensure its effectiveness. It is recommended that PRPE integrity be checked after the purchase using computed tomography, fluoroscopy, radiography or dedicated protective clothing testing machines. Due to prolonged use of heavy PRPE during clinical procedures, the personnel often report physical strain, thus if LEM exceeds the declared value, PRPE weight may be higher. Special protective clothing testing machines enable to perform LEM QA in an efficient way. Calibrated radiographic, CT, C-arm

equipment could be used for acquiring images of integrity and lead equivalence, however, only qualified personnel can perform the evaluation. Dedicated personnel should ensure that both visual inspections and inspections by touch are performed regularly for signs of damage or prior misuse.

To maximize LEM PRPE life, personnel should hang PRPE correctly between the use, wear them correctly, ensuring that the workers wear the correct size, transport and clean the PRPE in correct way, as it recommended by the manufacturer. The repair of PRPE does not guarantee a long-term solution for prolonging the lifespan of the protecting mean.

Authors' contribution: all authors participated in the study design, original text writing and performing the measurements. Kirill Skovorodko is the corresponding first author, he performed the experimental work, wrote the manuscript text, analyzed and interpreted the data. Antonio Jreije was involved in all stages of preparing the manuscript: the analysis of data, the interpretation of data, and writing and reviewing of this manuscript. Inga Andriulevičiūtė contributed with experimental work, methodology, data analysis and provided helpful feedback and comments on the manuscript. Leonid Krynkė was responsible for methodology, data analysis, the manuscript text writing. Birutė Gričienė was responsible for conceptualization of the article, she revised the manuscript and provided helpful comments and suggestions. All authors read and approved the final manuscript.

References

- Aral, N., Duch, M.A., & Ardanuy, M. (2020). Material characterization and Monte Carlo simulation of lead and non-lead X-ray shielding materials. *Radiat. Phys. Chem.*, 174. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.108892>
- Goldstein, J.A. (2015). Orthopedic afflictions in the interventional laboratory: tales from the working wounded. *J. Am. Coll. Cardiol.*, 65(8), 827–829. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2014.12.020>
- Kellens, P.J., De Hauwere, A., Gossye, T. et al. (2022). Integrity of personal radiation protective equipment (PRPE): a 4-year longitudinal follow-up study. *Insights Imaging*, 13, 183. <https://doi.org/10.1186/s13244-022-01323-3>
- Klein, L.W., Miller, D.L., Balter, S., Laskey, W., Haines, D., Norbash, A. et al. (2009). Occupational Health Hazards in the Interventional Laboratory: Time for a Safer Environment. *Radiology*, 250, 538–44.
- Klein, L.W., Miller, D.L., Balter, S. et al. (2018, Jan. 4). Occupational health hazards in the interventional laboratory: time for a safer environment. *Catheterization & Cardiovascular Interventions*. <https://doi.org/10.1002/ccd.21772>
- Kim, S.C., Choi, J.R., & Jeon, B.K. (2016). Physical analysis of the shielding capacity for a lightweight apron designed for shielding low intensity scattering X-rays. *Sci. Rep.*, 6, 27721.
- Lambert, K., & McKeon, T. (2001). Inspection of lead aprons: criteria for rejection. *Health Phys.*, 80 (5 SUPPL.), S67–S69. <https://doi.org/10.1097/00004032-200105001-00008>
- McCaffrey, J.P., Shen, H., Downton, B., & Mainegra-Hing, E. (2007). Radiation attenuation by lead and nonlead materials used in radiation shielding garments. *Med. Phys.*, 34(2), 530–537. <https://doi.org/10.1118/1.2426404>
- Moore, B., van Sonnenberg, E., Casola, G., & Novelline, R.A. (1992). The relationship between back pain and lead apron use in radiologists. *Am. J. Roentgenol.*, 158, 191–3.
- Peters, S.M.B., Zweers, D., de Lange, F., & Mourik, J.E.M. (2017). Lead composite vs. nonlead protective garments: which are better? A multivendor comparison. *Radiat Prot Dosim.*, 175(4), 460–465. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncw373>
- Stam, W., & Pillay, M. (2008). Inspection of Lead Aprons: A Practical Rejection Model. *Health Physics*, 95(2), p. S133–S136, August. <https://doi.org/10.1097/01.HP.0000314763.19226.86>
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). (2021). Report to general assembly. *Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, 2020/2021*, Vol. I.

Warren-Forward, H., Cardew, P., Smith, B., Clack, L., McWhirter, K., Johnson, S. et al. (2007). A comparison of dose savings of lead and lightweight aprons for shielding of 99m-Technetium radiation. *Radiat. Prot. Dosimetry*, 124, 89–96.

Webster, E.W. (1966). Experiments with Medium-Z Materials for Shielding Against Low-Energy X-Rays. *Radiology*, 86, 146.

Yaffe, M.J., Mawdsley, G.E., Lilley, M., Servant, R., & Reh, G. (1991). Composite materials for X-ray protection. *Health Phys.*, 60(5), 661–664. <https://doi.org/10.1097/00004032-199105000-00004>

Zuguchi, M., Chida, K., Taura, M., Inaba, Y., Ebata, A., & Yamada, S. (2008). Usefulness of non-lead aprons in radiation protection for physicians performing interventional procedures. *Radiat. Prot. Dosimetry*, 131, 531–534.

Отримано редакцією збірника / Received: 27.08.24

Прорецензовано / Revised: 20.09.24

Схвалено до друку / Accepted: 23.10.24

Кірілл СКОВОРОДКО¹, д-р філософії

ORCID ID: 0000-0001-7517-4767

e-mail: kirill.skov@gmail.com

Антоніо ЙРЕІЄ¹, асп.

ORCID ID: 0000-0001-9774-9461

e-mail: antonio.jreije@santa.lt

Інга АНДРІУЛЕВІЧІУТЕ¹

ORCID ID: 0009-0006-1580-6981

e-mail: inga.andriuleviciute@gmail.com

Леонід КРИНКЕ¹

ORCID ID: 0009-0006-1580-6981

e-mail: leonid.krynke@santa.lt

Біруте ГРІЦІЕНЕ^{1,2}, д-р філософії, доц.

ORCID ID: 0000-0002-9224-6512

e-mail: birute.griciene@santa.lt

¹Лікарня Вільнюського університету Santaros Klinikos, Вільнюс, Литва

²Вільнюський університет, Вільнюс, Литва

ПОДАЛЬШЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКВІВАЛЕНТНОСТІ СВИНЦЮ ТА ЦІЛІСНОСТІ ЗАСОБІВ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЗАХИСТУ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В КЛІНІЧНІЙ ПРАКТИЦІ

В с т у п . Індивідуальні засоби радіаційного захисту (ЗІЗ) – це жилети та спідниці, фартухи, коміри та інші компоненти, що знижують радіаційне опромінення персоналу, який працює із джерелами рентгенівського та гамма-випромінювання. Складові ЗІЗ, який носять радіологічний персонал для захисту від вторинного випромінювання, змінюється. Свинець замінюють на безсвинцеві матеріалами або композити (свинець з іншими елементами з великим атомним номером). У клінічній практиці використовуються ЗІЗ з різним еквівалентом свинцю. ЗІЗ зі свинцю або із матеріалу з еквівалентом свинцю (МЕС) мають важливе значення для забезпечення необхідного захисту від вторинного опромінення працівників.

М е т о д и . Визначення здатності ЗІЗ було проведено шляхом оцінювання стану цілісності та свинцевого еквіваленту для понад 800 засобів з МЕС 0,25, 0,35, 0,5 та 1 мм, наданих десятима виробниками протягом 2022–2024 років.

Результати. Для отримання зображень ЗІЗ і перевірки цілісності та еквівалента свинцю використовували мобільну випробувальну машину, призначену для контролю рівня захисту від рентгенівського випромінювання, FLOWD 8020, систему для хірургічної візуалізації Philips BV Endura mobile C-arm, комп'ютерний томограф Philips Incisive CT і цифрову рентгенівську систему Siemens Luminos dRF MAX 3D. Перевірку ослаблення випромінювання виконували за допомогою каліброваного твердотілого вимірювача Piranha R&F/M 657 із зовнішнім зондом RTI Dose Probe. Перевірку цілісності ЗІЗ було здійснено за чотирма категоріями: I (хороша якість), II (невеликі тріщини), III (великі тріщини не в критичних ділянках і площею менше 5 кв. см), IV (дуже великі тріщини, тріщини в критичних місцях, тріщини площею більше 5 кв. см). Відхилення значення еквівалентності свинцю були проаналізовані та ЗІЗ згруповані в три категорії: DI (менше 5 %), DII (менше 10 %), DIII (більше 10 %).

Висновки. Результати випробувань на цілісність показали, що близько 85 % ЗІЗ мають належну якість. Аналіз відхилень еквівалентності свинцю показав, що близько 76 % ЗІЗ відповідали критеріям категорії DI. Метою дослідження було оцінити різними методами скринінгу еквівалентність свинцю та цілісність ЗІЗ, що використовується в клінічній практиці.

Ключові слова: засоби індивідуального радіаційного захисту, свинцеві захисні засоби, радіаційний захист.

Автори К. Сковородко, А. Йреїс, І. Андріулевічіуте, Л. Кринке та Б. Гріцієне заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors K. Skovorodko, A. Jreije, I. Andriulevičiūtė, L. Krynke and B. Gricienė declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

UDC 616-006.66

DOI: <https://doi.org/10.17721/3041-1491/2024.11-12>

Hanna FEDORENKO¹, Radiation Oncologist
e-mail: hanna.fedorenko.98@gmail.com

Serhiy ROMANENKO¹, Radiation Oncologist
e-mail: md.romanenko@gmail.com

Oksana KOZAK¹, PhD (Biol.)
e-mail: oko.bydenko@gmail.com

Lyidmila ROMANENKO¹, Radiation Oncologist
e-mail: lyidmila.romanenko@gmail.com

Oksana RODAK¹, Med. Assist.
e-mail: rodakoksana9@gmail.com

¹Region Oncology Hospital, Kyiv, Ukraine

SIGNIFICANCE OF BRACHYTHERAPY TREATMENT IN ADVANCED CANCER OF TRANSVERSE COLON (CASE REPORT)

Introduction. *Colorectal cancer, including cancer of the transverse colon, is known for its potential to metastasize to distant organs. Although the liver and lungs are common metastatic sites, metastasis to the vagina is rare and poses unique challenges for treatment.*

Methods. *This case report details a rare instance of vaginal metastasis in a 58-year-old patient with advanced transverse colon adenocarcinoma. According to our experience, intracavitary brachytherapy of metastasis into the vagina is not effective, especially in cases of volumetric tumors.*

Results. *As a rule, we use interstitial brachytherapy with an intracavitary applicator of maximal diameter. Over a 24-month follow-up period, there was no local recurrence or progression of the disease, along with improved quality of life for the patient.*

Conclusions. *This case highlights the importance of personalized treatment approaches and underscores the need for further research to optimize brachytherapy protocols for the effective treatment of rare metastatic sites in colorectal cancer.*

Keywords: *brachytherapy, transverse colon cancer, metastasis, intratissue irradiation.*

Introduction

For advanced colon cancer, a special approach is required, which involves doctors of different specializations in oncology. Radiation therapists working in the field of external beam radiation therapy and brachytherapy usually take an active part in treatment. The result of treatment usually depends on the well-coordinated work of the team. The main task of radiation therapists was to eliminate vaginal metastases using interstitial brachytherapy after combined treatment of a patient with transverse colon adenocarcinoma.

Methods

In 2020, a 58-year-old female patient was diagnosed with stage IIA transverse colon cancer, T3N0M0, adenocarcinoma G1. We obtained written informed consent from the

© Fedorenko Hanna, Romanenko Serhiy, Oksana Kozak,

Romanenko Lyidmila, Rodak Oksana, 2024

patient to present this clinical case. She underwent a right-sided hemicolectomy combined with an atypical resection of the left liver lobe. A few months later, the disease progressed with secondary involvement of both ovaries and the iliac lymph nodes. She underwent further surgery: a type II panhysterectomy with selective lymph node dissection. Additionally, she received multiple courses of chemotherapy (8 courses with oxaliplatin and capecitabine and 6 courses with irinotecan).

In 2021, disease progression was again diagnosed, presenting as secondary involvement of the retroperitoneal and mesenteric lymph nodes, along with the discovery of a metastasis in the vagina. Surgical intervention was performed, including retroperitoneal lymph node dissection, followed by 6 courses of chemotherapy (leucovorin, irinotecan, 5-FU), and combined radiation therapy. 39,6 Gy (2.2 Gy*18 fractions) to pelvis with concomitant intracavitary brachytherapy 7 Gy*4, total dose 28 Gy with normalization 5 mm from mucosa was delivered (Kwon et al., 2020).

In three months, volumetric lesion in vagina right wall was confirmed at CT scans and visually. Intratissue brachytherapy with rigid needles was decided to use. Dose distribution and needle location is shown at the Fig. 1. Needle insertion was done by freehand under anesthesia. Doses amounted to 30 Gy (1 time per week, 10 Gy fraction). Treatment was carried out at Microselectron 30 channels on the base of CT scans (Marchal et al., 2006). The radiation reactions (burning and profuse discharge) observed were consistent with Grade 2 criteria according to the Common Terminology Criteria for Adverse Events (CTCAE). These reactions lasted one month approximately.



Fig. 1. Dose distribution and needles location in the first fraction

Results

Following the initial intratissue brachytherapy treatment, the patient's positive clinical outcomes were reflected in the three-month contrast-enhanced CT scans, which showed no pathological lesions and no signs of tumor recurrence in the vagina. This early response is indicative of the therapy's efficacy in targeting and controlling localized disease. Intratissue brachytherapy's ability to deliver precise, high-dose radiation directly to the tumor while minimizing exposure to adjacent healthy tissues is a significant advantage. This targeted approach not only enhances the effectiveness of the treatment but also reduces potential side effects, thereby improving the patient's overall quality of life.

Long-term follow-up at the two-year mark further affirms the success of the intratissue brachytherapy approach. The sustained absence of disease progression over this period demonstrates the durability and effectiveness of the treatment in managing vaginal metastases. This extended period of disease control is particularly noteworthy, as it underscores the potential for intratissue brachytherapy to provide long-lasting results compared to more traditional treatment methods. The reduced likelihood of disease recurrence or progression suggests that this technique could be a viable option for patients requiring localized treatment with minimal systemic impact.

Furthermore, the observed benefits of intratissue brachytherapy extend beyond disease control to include significant improvements in patient well-being. The precision of the treatment not only ensures targeted tumor destruction but also minimizes damage to surrounding healthy tissues, leading to fewer complications and a better quality of life. This favorable outcome highlights the technique's potential for broader application in managing similar conditions. The promising results from this case advocate for continued research and consideration of intratissue brachytherapy as a preferred modality for localized tumor management, potentially offering improved patient outcomes and enhanced therapeutic efficacy.

Discussion and conclusions

This case underscores the importance of brachytherapy in achieving local control in patients at advanced stages of cancer, supporting a multidisciplinary approach to cancer treatment. Intratissue brachytherapy proves to be an effective method for managing vaginal metastases in colorectal cancer patients, as evidenced by successful disease control and absence of progression during a two-year follow-up period.

In addition to the positive clinical outcomes, the patient experienced minimal side effects during the course of treatment. The precision of intratissue brachytherapy, particularly with the use of rigid needles, allowed for targeted radiation delivery that spared healthy surrounding tissues, reducing the likelihood of severe radiation-induced complications. The management of any mild side effects, such as temporary local irritation, was effectively handled through supportive care, ensuring the patient's comfort throughout the treatment period.

Furthermore, this case highlights the potential of intratissue brachytherapy as a valuable component in the multidisciplinary management of complex oncological cases. By integrating this approach with other treatments, such as surgery and

systemic therapies, we were able to achieve a high level of disease control. This underscores the importance of ongoing research and clinical trials to further refine intratissue brachytherapy techniques and establish standardized protocols that can be widely adopted in clinical practice, ultimately improving outcomes for patients with advanced or recurrent cancers.

Authors' contribution: Hanna Fedorenko and Serhiy Romanenko – conceptualization; Oksana Kozak – methodology, writing-review and editing, visualization; Hanna Fedorenko – software, formal analysis, writing-original draft preparation; Lyidmila Romanenko, Serhiy Romanenko and Oksana Kozak – validation; Serhiy Romanenko – investigation, supervision, funding acquisition; Lyudmyla Romanenko – resources; Oksana Rodak – data curation; project administration.

Acknowledgements, sources of funding. We sincerely thank Lyudmyla Vasylyvna Romanenko, Head of Radiation Therapy, and Alla Oleksandrivna Areshkovich, Chief Physician of the Kyiv Regional Oncology Dispensary, for their invaluable support and contributions to the development of brachytherapy.

We acknowledge the following institutions and organizations for their contributions to this research: Kyiv Regional Oncology Dispensary.

References

Kwon, S.K., Yu, C.S., Lee, S.W., Kim, J., Song, I., Lee, J.L., Kim, C.W., Yoon, Y.S., Park, I.J., Lim, S.B., & Kim, J.C. (2020). Isolated vaginal metastasis from stage I colon cancer: A case report. *World J. Clin. Cases*, 8(3), 527–534. <https://doi.org/10.12998/wjcc.v8.i3.527>

Marchal, F., Leroux, A., Hoffstetter S., & Granger P. (2006). Vaginal metastasis revealing colon adenocarcinoma. *Int. J. Colorectal. Dis.*, 21, 861–862. <https://doi.org/10.1007/s00384-004-0734-x>

Отримано редакцією збірника / Received: 08.07.24

Прорецензовано / Revised: 23.08.24

Схвалено до друку / Accepted: 30.09.24

Ганна ФЕДОРЕНКО¹, лікар з променевої терапії
e-mail: hanna.fedorenko.98@gmail.com

Сергій РОМАНЕНКО¹, лікар з променевої терапії
e-mail: md.romanenko@gmail.com

Оксана КОЗАК¹, канд. біол. наук
e-mail: oko.bydenko@gmail.com

Людмила РОМАНЕНКО¹, лікар з променевої терапії
e-mail: lyidmila.romanenko@gmail.com

Оксана РОДАК¹, мед. асист.
e-mail: rodakoksana9@gmail.com

¹Київський обласний онкологічний диспансер, Київ, Україна

ЗНАЧЕННЯ БРАХІТЕРАПІЇ В ЛІКУВАННІ ПОШИРЕНОГО РАКУ ПОПЕРЕЧНО-ОБОДОВОЇ КИШКИ (КЛІНІЧНИЙ ВИПАДОК)

Вступ. Колоректальний рак відомий своєю здатністю метастазувати у віддалені органи. Але метастази у вагіну зустрічаються досить рідко, тому це створює певні виклики для визначення тактики лікування. Хочемо показати наш

успішний досвід використання внутрішньотканинної брахітерапії для елімінації вагінальних метастазів колоректальної аденокарциноми.

Методи. Унікальність описаного випадку в застосуванні цього методу лікування після проведеного курсу дистанційної променевої терапії на малий таз і внутрішньопорожнинної брахітерапії (через 3 місяці КТ-дослідження і гінекологічний огляд підтвердили наявність об'ємного ураження правої стінки вагіни).

Результати. Було прийнято рішення застосувати жорсткі голки. Сумарна вогнище-доза становила 30,0 Гр, разова – 10,0 Гр. Обстеження через 3 місяці підтвердили повну регресію утворення. Контрольне КТ-дослідження, фізикальний огляд через 2 роки показали відсутність ознак продовження хвороби.

Висновки. Описаний випадок вказує на важливість персоналізованого підходу до кожного пацієнта, а також значення брахітерапії для локального контролю поширених форм колоректального раку. Внутрішньотканинна брахітерапія має велику перевагу над внутрішньопорожнинною брахітерапією, особливо за наявності об'ємних новоутворень. Тому важливо продовжувати розробку протоколів та проведення подальших досліджень у сфері внутрішньотканинної брахітерапії для покращення результатів лікування і використання максимального потенціалу цього методу лікування.

Ключові слова: *брахітерапія, рак поперечно-ободової кишки, вагінальні метастази.*

Автори Г. Федоренко, С. Романенко, О. Козак, Л. Романенко та О. Родак заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors H. Fedorenko, S. Romanenko, O. Kozak, L. Romanenko and O. Rodak declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

Тетяна ПАВЛЕНКО, д-р біол. наук, проф.

ORCID ID: 0000-0003-0615-3123

e-mail: tpavlenko@ukr.net

Державна установа "Інститут громадського здоров'я ім. О.М. Марзеєва"

Національної академії медичних наук України, Київ, Україна

Мирослава ФРИЗЮК, канд. біол. наук

ORCID ID: 0000-0003-0764-010X

e-mail: m.friziuk@gmail.com

Державна установа "Інститут громадського здоров'я ім. О.М. Марзеєва"

Національної академії медичних наук України, Київ, Україна

ДЕРЖАВНИЙ ПЛАН ЗАХОДІВ ЩОДО РАДОНУ – МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЙОГО РЕАЛІЗАЦІЇ

Вступ. Згідно з українським законодавством місцеві органи виконавчої влади та органи місцевого самоврядування відповідають за забезпечення радіаційного захисту населення, інформування про радіаційні ризики, запровадження відповідних програм та їх фінансування. Саме ця делегована відповідальність за практичну реалізацію плану заходів і компетенції вимагають від державних органів влади забезпечення територіальних громад відповідними інструментами, які дозволяють реалізувати ці вимоги на практиці відповідними нормативно-правовими документами. Метою роботи є обґрунтування та розробка нормативних та методичних документів щодо радону відповідно до міжнародних стандартів для реалізації Плану заходів.

Методи. У процесі роботи було проведено порівняльний аналіз вимог міжнародних та вітчизняних регламентів з питань радіаційного захисту населення щодо опромінення природними джерелами випромінювання.

Результати. У роботі наведено основні результати виконання першого етапу радонового державного плану заходів у контексті розробки методичного забезпечення основних напрямів реалізації програми. Основний акцент роботи було зроблено на обґрунтуванні та вимогах цих нормативних документів щодо вимірювань радону в повітрі житлових і громадських будинків, системі гарантій якості цих вимірювань та процедурах звірення, оцінювання доз опромінення та радіаційних ризиків тощо.

Висновки. Надано інформацію про інші методичні рекомендації, які сьогодні перебувають на стадії затвердження МОЗ України і стосуються окремих аспектів реалізації завдань плану заходів та зменшення доз опромінення населення України від природних джерел.

Ключові слова: радон, план заходів, населення, природні радіонукліди, методичні рекомендації.

Вступ

У листопаді 2019 року Кабінет Міністрів України затвердив державний план заходів щодо радону (далі – План заходів), який за своєю змістовною частиною відповідає вимогам Директиви Ради 2013/59/Euratom від 5 грудня 2013 р. та Основних стандартів безпеки Міжнародного агентства за атомної

© Павленко Тетяна, Фризюк Мирослава, 2024

енергії (МАГАТЕ) (Кабінет Міністрів України, 2019; Council Directive 2013/59/Euratom, 2013; IAEA Safety Standards, 2014; IAEA SSG-32, 2015). Аналіз ситуації в Україні щодо рівнів опромінення населення встановив, що подальша успішна реалізація Плану заходів залежить насамперед від наявності відповідної нормативно-правової бази та чіткого розподілу обов'язків щодо виконання окремих його завдань. У серпні 2023 року до Закону України "Про захист людини від впливу іонізуючого випромінювання" (Верховна Рада України, 1998) були внесені зміни відповідно до вимог нової системи радіаційного захисту та реформ децентралізації, які були здійснені в попередні роки. Стаття 10 цього закону віднесла до компетенції місцевих органів виконавчої влади та органів місцевого самоврядування функції забезпечення радіаційного захисту населення, інформування про радіаційні ризики, запровадження відповідних програм тощо. Такі компетенції вимагають від державних органів влади забезпечення територіальних громад відповідними інструментами, що дозволяють реалізувати ці вимоги на практиці, а саме: низкою нормативно-правових документів (методичних рекомендацій, вказівок, інструкцій тощо), які містять алгоритми дій щодо вимірювання радону в повітрі та оцінювання радононебезпечності територій, перелік та пояснення можливих захисних заходів тощо. Наприклад, з метою визначення радіаційних ризиків для населення від радону необхідно правильно спланувати дослідження, забезпечити його репрезентативність (вибірка, доцільна кількість вимірювань тощо) для подальшого оцінювання рівнів опромінення, мати методики встановлення-зняття радонометрів, провести інтегральні вимірювання, визначити відповідні ефективні дози, розрахувати величину ризиків, дати рекомендації щодо протирадонових заходів.

Метою роботи є обґрунтування та розробка нормативних та методичних документів щодо радону відповідно до міжнародних стандартів для реалізації Плану заходів.

Методи

Проведено порівняльний аналіз вимог міжнародних та вітчизняних регламентів з питань радіаційного захисту населення щодо опромінення природними джерелами випромінювання. Для обґрунтування окремих положень документів були проаналізовані результати вимірювань радону баз даних лабораторії радіаційного захисту ДУ "Інститут громадського здоров'я ім. О.М. Марзєєва НАМН України" (ДУ "ІГЗ НАМНУ") щодо концентрацій активності радону в повітрі приміщень та вмісту природних радіонуклідів у будівельних матеріалах і сировині. Вимірювання радону проводились за єдиними протоколами методом пасивної трекової радонометрії з часом експозиції не менше 30 діб в опалювальний сезон. Система гарантій якості вимірювання забезпечувалася калібруванням трекових детекторів у радоновий атмосфері, яка має статус робочого еталона, та процедурами порівнянь зі Шведською агенцією з питань радіаційного захисту.

Дослідження вмісту природних радіонуклідів (ПРН) у будівельних матеріалах та сировині проводились спектрометричним методом із застосуванням гамма-спектрометричної системи ORTEK (США) зі сцинтиляційним детектором NaI (Т1). Для калібрування гамма-спектрометра використовувалось стандартне джерело AMERSHAM (Німеччина).

Результати

На першому етапі реалізації Плану заходів лабораторією радіаційного захисту ДУ "ІГЗ НАМНУ" були проаналізовані власні бази даних щодо концентрацій активності радону в повітрі житлових приміщень та закономірності їх формування, а також результати вимірювань вмісту ПРН у будівельних матеріалах та сировині, мінеральних добривах, відходах / залишках промислових підприємств України (Pavlenko, et al., 2010, S06-P06; Павленко та ін., 2015, с. 21–24; Pavlenko et al., 2014, р. 213–216; Павленко та ін., 2020, с. 220–229; Павленко та ін., 2021, с. 14–20). Проведений аналіз дозволив визначити основні вимоги до первинного обстеження населених пунктів, обґрунтувати і сформулювати відповідні положення ряду нормативних документів, які безпосередньо стосуються подальшої успішної реалізації Плану заходів, а саме:

- розробити санітарний регламент "Основні стандарти безпеки поводження з матеріалами, які містять радіонукліди природного походження";
- розробити методичні рекомендації "Методика проведення моніторингу радону";
- розробити методичні рекомендації "Визначення та оцінювання концентрацій активності радону на робочих місцях".

Санітарний регламент (СР) "Основні стандарти безпеки поводження з матеріалами, які містять радіонукліди природного походження" містить загальні вимоги щодо забезпечення радіаційного захисту населення від впливу природних джерел іонізуючого випромінювання у житлових приміщеннях, на робочих місцях, у громадських і виробничих будівлях / спорудах, а також встановлює базові медичні вимоги захисту та безпеки в існуючих ситуаціях опромінення щодо радіологічних ризиків у середовищі життєдіяльності людини та вимоги безпеки для людини, недотримання яких створює загрозу її здоров'ю і життю.

СР запроваджує референтні рівні щодо опромінення природними джерелами для різних сценаріїв опромінення, а саме: для вмісту радону-222 (газу) у повітрі житлових, громадських та офісних приміщень загального призначення та непов'язаних з виробництвом – 300 Бк/м³; вмісту радону-222 (газу) для приміщень дитячих закладів (дитячі садочки, школи та інші освітні заклади), лікувальних та оздоровчих установ – 100 Бк/м³.

Для визначення радононебезпечності будівель і споруд на етапах вибору земельної ділянки документ передбачає проводити дослідження концентрації активності радону в ґрунтовому повітрі. Якщо визначені концентрації активності

грунтового радону в межах контуру забудови становлять понад 30 000 Бк/м³, проєкт споруди має передбачати систему протирадонового захисту.

Окрім цього документ також містить:

- вимоги до вмісту природних радіонуклідів у мінеральних добривах та агрохімікатах;
- вимоги щодо забезпечення радіаційної безпеки під час поводження з мінеральною сировиною і матеріалами з підвищеним вмістом природних радіонуклідів;
- вимоги щодо забезпечення радіаційної безпеки під час поводження з виробничими залишками з підвищеним вмістом природних радіонуклідів;
- вимоги до матеріалів, що використовуються під час будівництва (реконструкції, капітальному ремонті) житлових і громадських будівель та споруд тощо.

Щодо опромінення на робочих місцях документ запроваджує обмеження сумарної додаткової річної ефективної дози опромінення працівника від природного радіоактивного матеріалу на робочому місці 6 мЗв за календарний рік та містить референтні рівні щодо вмісту радону на робочих місцях.

Алгоритми проведення вимірювань і порядок визначення й оцінювання рівнів опромінення працівників від ПРН з радоном включно для різних сценаріїв опромінення містять методичні рекомендації "Визначення та оцінювання концентрацій активності радону на робочих місцях". Цей документ насамперед стосується підприємств та видів діяльності, які відповідають існуючій ситуації опромінення, тобто тих робочих місць, на яких опромінення ПРН, включно з радоном, є невід'ємною частиною технологічного процесу. Такий тип робочих місць, у першу чергу, притаманний підприємствам з видобутку та переробки корисних копалин. Для цього сценарію оцінювання рівнів опромінення від ПРН на робочих місцях для більшості підприємств будуть пов'язані із зовнішнім опроміненням поблизу місць складування сировини та в місцях розташування залишків / відходів виробництва з підвищеним вмістом ПРН. Другий сценарій опромінення – це звичайні робочі місця в приміщеннях громадських будівель, де опромінення працівників визначається концентраціями активності радону в повітрі, а джерелом його надходження у приміщення є підстиляючі ґрунти.

У 2023 р. МОЗ України затвердило також методичні рекомендації щодо вимірювань радону в повітрі житлових та громадських будинків у контексті проведення первинного обстеження населених пунктів. Ці методичні рекомендації містять алгоритм дій щодо визначення концентрацій активності радону в будинках, громадських спорудах та закладах, алгоритми аналізу цих даних, за умови, що вони репрезентативні, методики оцінювання радіаційних ризиків населення тощо. Рекомендації запроваджують єдині протоколи процедур вимірювання концентрацій радону, правила проведення міжлабораторних порівнянь, вимоги до експозиції радонometrів тощо. Застосування цих правил та вимог створює умови для подальшої розробки та

функціонування державних баз даних щодо рівнів радону в приміщеннях та на робочих місцях, а також запровадження єдиного інформаційного простору щодо радіаційних ризиків, систем аналізу даних для оцінювання ефективності реалізації Плану заходів та підтримки прийняття подальших рішень місцевими органами виконавчої влади щодо необхідності втручання і радіаційного захисту населення окремих громад тощо.

Лабораторія продовжує працювати над методичним забезпеченням Плану заходів і планує в подальшому розробити проекти методичних рекомендацій щодо оцінювання ефективності протирадонових заходів, оцінювання будівельних майданчиків, визначення індексів якості для будівельних матеріалів і мінеральної сировини.

Дискусія і висновки

1. Аналіз українського законодавства свідчить, що без методичних та інструктивних документів для місцевих органів виконавчої влади та органів місцевого самоврядування реалізація державної політики у сфері радіаційного захисту населення за браком фахівців на місцевому рівні неможлива.

2. Розроблені нормативно-методичні документи не тільки повністю відповідають вимогам міжнародних нормативно-правових документів, але й враховують вітчизняний досвід щодо обмеження опромінення населення природними джерелами.

3. Розроблені та затверджені МОЗ України методичні документи становлять не більше 20 % від загальної потреби щодо методичного забезпечення виконання завдань державного радонового плану заходів.

Внесок авторів: Тетяна Павленко – концептуалізація, методологія, написання – оригінальна чернетка; Мирослава Фризюк – методологія, написання – перегляд і редагування.

Подяки, джерела фінансування. Автори висловлюють щирі подяку канд. біол. наук М.В. Аксьонову – колишньому провідному співробітнику лабораторії радіаційного захисту ДУ "ІГЗ НАМНУ" та канд. мед. наук А.П. Оперчуку – завідувачу відділом епідеміології неінфекційних захворювань та факторів навколишнього середовища ДУ "Центр громадського здоров'я МОЗ України" за вагомий внесок у розробку Санітарного регламенту та методичних рекомендацій.

Робота виконана в рамках НДР "Забезпечення науково-методичного супроводу державного плану заходів щодо зменшення рівнів радону в повітрі житлових та громадських будинків" за фінансування Національної академії медичних наук України.

Список використаних джерел

Верховна Рада України. (1998). Про захист людини від впливу іонізуючого випромінювання (закон України від 17.09.2023, № 15/98-ВР, підстава 3344-ІХ). *Відомості Верховної Ради України*, 1998, № 22, ст. 115. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/15/98-%D0%B2%D1%80#Text>

Кабінет Міністрів України. (2019). *Про затвердження плану заходів щодо зниження рівня опромінення населення радоном та продуктами його розпаду, мінімізації довгострокових ризиків від поширення радону в житлових та нежитлових будівлях, на робочих місцях на 2020–2024 роки* (розпорядження від 27.11.2019 р. № 1417-р, ред. від 27.11.19). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1417-2019-%D1%80#Text>

Павленко, Т.О., Аксьонов, М.В., Шабуніна, Н.Д., Фризиук, М.А., Тарасюк, О.Є., Ковтонюк, Н.Л., Семенюк, Н.Д., Федоренко, О.В., & Михайленко, О.В. (2015). Оцінка вмісту природних радіонуклідів в індустріальних залишках підприємств. *Довкілля та здоров'я*, 1(72), 21–24.

Павленко, Т.О., Оперчук, А.П., Аксьонов, М.В., Фризиук, М.А., Михайленко, О.В., & Горваль, А.К. (2021). Першочергові завдання плану дій щодо зменшення рівнів радону в повітрі будинків. Ядерна та радіаційна безпека. *Nuclear and Radiation Safety*, 1(89), 14–20. [https://doi.org/10.32918/nrs.2021.1\(89\).02](https://doi.org/10.32918/nrs.2021.1(89).02)

Павленко, Т.О., Сердюк, А.М., Оперчук, А.П., Аксьонов, М.В., Фризиук, М.А., Тарасюк, О.Є., Федоренко, О.В., & Михайленко, О.В. (2020). Рівні опромінення населення України в контексті плану дій щодо зменшення рівнів радону в повітрі приміщень. *Проблеми радіаційної медицини та радіобіології*, 25, 220–229. https://radiationproblems.org.ua/25_2020/NCRM_2020_Paper_11.pdf

Council Directive 2013/59/Euratom. (2013, Dec. 5). Laying Down Basic Safety Standards for Protection against the Dangers Arising from Exposure to Ionizing Radiation, and Repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom. *Official Journal of the European Union*, 57, L13, 73.

IAEA Safety Standards. (2014). *Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards*. International Atomic Energy Agency. General Safety Requirements No. GSR Part 3. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1578_web-57265295.pdf

IAEA Safety Standards. (2015). *Protection of the Public against Exposure Indoors due to Radon and Other Natural Sources of Radiation*. IAEA Specific Safety Guide No. SSG-32. <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1651Web-62473672.pdf>

Pavlenko, T., Aksyonov, M., German, O., Friziuk, M., Fedorenko, E., & Mikhajlenko, A. (2014). NORM Assessment at Gas and Oil Fields in Ukraine. In Breton J.G.C. (Eds.), *Latest trends in energy, environment and development* (pp. 213–216). WSEAS Press. https://www.researchgate.net/publication/266517546_NORM_assessment_at_gas_and_oil_fields_in_Ukraine

Pavlenko, T., German, O., Serdyk, A., Los', I., & Aksenov, N. (2010). Ukrainian Experience of Monitoring of Radiation Exposure of Population Determined by Building Materials. In *Norm – Normally occurring radiative materials. Proc. of Third European IRPA Congress*, S06-P06. <http://www.irpa2010europe.com/pdfs/proceedings/S06-P06.pdf>

References

Cabinet of Ministers of Ukraine. (2019). *On the approval of the plan of measures to reduce the level of exposure of the population to radon and its decay products, to minimize long-term risks from the spread of radon in residential and non-residential buildings, at workplaces for 2020-2024* (order dated 11/25/2019 No. 1417-p, revised 11/27/19) [in Ukrainian]. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1417-2019-%D1%80#Text>

Council Directive 2013/59/Euratom. (2013, Dec. 5). Laying Down Basic Safety Standards for Protection against the Dangers Arising from Exposure to Ionizing Radiation, and Repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom. *Official Journal of the European Union*, 57, L13, 73.

IAEA Safety Standards. (2014). *Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards*. International Atomic Energy Agency. General Safety Requirements No. GSR Part 3. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1578_web-57265295.pdf

IAEA Safety Standards. (2015). *Protection of the Public against Exposure Indoors due to Radon and Other Natural Sources of Radiation*. IAEA Specific Safety Guide No. SSG-32. <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1651Web-62473672.pdf>

Pavlenko, T., Aksyonov, M., German, O., Friziuk, M., Fedorenko, E., & Mikhajlenko, A. (2014). NORM Assessment at Gas and Oil Fields in Ukraine. In Breton J.G.C. (Eds.), *Latest trends in energy, environment and development* (pp. 213–216). WSEAS Press. https://www.researchgate.net/publication/266517546_NORM_assessment_at_gas_and_oil_fields_in_Ukraine

Pavlenko, T.O., Aksenov, M.V., Shabunina, N.D., Fryziuk, M.A., Tarasiuk, O.Y., Kovtoniuk, N.L., Semeniuk, N.D., Fedorenko, O.V., & Mykhailenko, O.V. (2015). Assessment of the content of natural

radionuclides in the industrial residues of enterprises. *Dovkillia ta zdorovia Environment and health*, 1(72), 21–24 [in Ukrainian].

Pavlenko, T.O., Serdiuk, A.M., Operchuk, A.P., Aksenov, M.V., Fryziuk, M.A., Tarasiuk, O.Y., Fedorenko, O.V., & Mykhailenko, O.V. (2020). Exposure levels of the population of Ukraine in the context of the action plan for reducing radon levels in indoor air. *Problems of radiation medicine and radiobiology*, 25, 220–229 [in Ukrainian]. https://radiationproblems.org.ua/25_2020/NCRM_2020_Paper_11.pdf

Pavlenko, T.O., Operchuk, A.P., Aksenov, M.V., Fryziuk, M.A., Mykhailenko, O.V., & Horval, A.K. (2021). Priority tasks of the action plan to reduce radon levels in the air of buildings. *Yaderna ta radiatsiina bezpeka Nuclear and Radiation Safety*, 1(89), 14–20 [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.32918/nrs.2021.1\(89\).02](https://doi.org/10.32918/nrs.2021.1(89).02)

Pavlenko, T., German, O., Serdyk, A., Los', I., & Aksenov, N. (2010). Ukrainian Experience of Monitoring of Radiation Exposure of Population Determined by Building Materials. In *Norm – Normally occurring radiative materials. Proc. of Third European IRPA Congress*, S06-P06. <http://www.irpa2010europe.com/pdfs/proceedings/S06-P06.pdf>

Verkhovna Rada of Ukraine. (1998). *About human protection from the effects of ionizing radiation* (law of Ukraine dated 17.09.2023, No. 15/98-VR, citation 3344-IX). *Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine*, 1998, No. 22, Art. 115 [in Ukrainian]. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/15/98-%D0%B2%D1%80#Text>

Отримано редакцією збірника / Received: 02.07.24

Прорецензовано / Revised: 19.07.24

Схвалено до друку / Accepted: 30.09.24

Tetiana PAVLENKO, DSc (Biol.), Prof.

ORCID ID: 0000-0003-0615-3123

e-mail: tpavlenko@ukr.net

**State Institution "O. M. Marzieiev Institute for Public Health
of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine", Kyiv, Ukraine**

Myroslava FRYZIUK, PhD (Biol.)

ORCID ID: 0000-0003-0764-010X

e-mail: m.fryziuk@gmail.com

**State Institution "O. M. Marzieiev Institute for Public Health
of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine", Kyiv, Ukraine**

STATE ACTION PLAN FOR RADON – METHODOLOGICAL SUPPORT FOR ITS IMPLEMENTATION

Introduction. *According to Ukrainian legislation, local executive authorities and local self-government bodies are responsible for ensuring radiation protection of the population, informing about radiation risks, implementing relevant programs and financing them. It is this delegated responsibility for the practical implementation of the action plan and competences that require state authorities to provide territorial communities with appropriate tools that allow these requirements to be implemented in practice by relevant regulatory and legal documents. The purpose of the work is to substantiate and develop regulatory and methodological documents on radon in accordance with international standards for the implementation of the Action Plan.*

Methods. *In the process of work, a comparative analysis of the requirements of international and domestic regulations on radiation protection of the population regarding exposure to natural sources of radiation was conducted.*

Results. *The work presents the main results of the implementation of the first stage of the radon state action plan in the context of developing methodological support for the main areas of program implementation. The main emphasis of the work was placed on the justification and requirements of these regulatory documents regarding radon*

measurements in the air of residential and public buildings, the quality assurance system for these measurements and verification procedures, assessment of radiation doses and radiation risks, etc.

C o n c l u s i o n s . *Information is provided on other methodological recommendations that are currently at the stage of approval by the Ministry of Health of Ukraine and relate to individual aspects of the implementation of the tasks of the action plan and the reduction of radiation doses to the population of Ukraine from natural sources.*

K e y w o r d s : *radon, action plan, population, natural radionuclides, methodological recommendations.*

Автор М. Фризиук заявляє про відсутність конфлікту інтересів. Член редакційної колегії Т. Павленко заявляє про відсутність конфлікту інтересів та невтручання в процес оцінювання цієї статті відповідно до міжнародних стандартів публікаційної етики. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The author M. Fryziuk declares no conflict of interest. The member of the Editorial board T. Pavlenko declares no conflict of interest and has not interfered in the evaluation process of this article, in accordance with international publication ethics standards. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

Юрій СКАЛЕЦЬКИЙ¹, д-р мед. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0001-7527-6827
e-mail: syn1953@ukr.net

Олександр ЯВОРОВСЬКИЙ², д-р мед. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0002-4573-8039
e-mail: kgpnmu@ukr.net

Роман БРУХНО², канд. мед. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0002-6666-397X
e-mail: bruhnoroman@ukr.net

Михайло РИГАН³, д-р мед. наук
ORCID ID: 0000-0003-1244-9801
e-mail: syn1953@ukr.net

Сергій КРАВЧЕНКО¹, асп.
ORCID ID: 0000-0002-3097-8136
e-mail: syn1953@ukr.net

¹ДУ "Інститут громадського здоров'я імені О.М. Марзєєва НАМН України",
Київ, Україна

²Національний медичний університет імені О.О. Богомольця, Київ, Україна

³Національний університет фізичного виховання і спорту України, Київ, Україна

СПІВПРАЦЯ ВІТЧИЗНЯНОЇ НАУКИ І МЕДИЧНОЇ ПРАКТИКИ У ФОРМУВАННІ КУЛЬТУРИ БЕЗПЕКИ В МЕДИЧНІЙ ГАЛУЗІ

Вступ. Метою публікації став аналіз результатів нашої діяльності з удосконалення культури безпеки в медичній галузі та оцінювання впливу цих напрацювань на вітчизняну медичну практику.

Методи. У ході роботи використовувалися наші попередні тематичні публікації, методичні розробки, нормативна база і звітні матеріали центральних органів державної влади щодо питань безпеки в охороні здоров'я України.

Результати. Нами встановлено, що проблеми безпеки у вітчизняній системі охорони здоров'я є надзвичайно актуальними в медичному та соціально-економічному аспекті. Вони вимагають з боку держави невідкладного втручання. Зокрема, нами всебічно оцінено стан культури безпеки у вітчизняній системі охорони здоров'я і в цілому визнано її реактивний характер. У Міністерстві охорони здоров'я України зроблено певні спроби розвивати культуру безпеки лише за окремим напрямом (культура дотримання гігієни рук), у той час як такий підхід не охоплює інших безпекових проблем, які існують в ЗОЗ.

Висновки. Єдиний спосіб розпочати незворотний поступ на шляху до розбудови безпечного лікарняного середовища полягає у тісній співпраці медичного менеджменту, медичної громадськості і медичної науки.

Ключові слова: культура безпеки, заклади охорони здоров'я, медичні працівники.

Вступ

Вивчаючи інтернет-сторінки Міжнародної асоціації радіаційного захисту (IRPA), Альянсу міжнародного радіологічного товариства з якості та безпеки

© Скалецький Юрій, Яворовський Олександр, Брухно Роман,
Риган Михайло, Кравченко Сергій, 2024

(ISRQSA) і її регіональних та національних представництв, Міжнародної організації медичної фізики (IOMP), Міжнародного товариства радіографів і радіологічних технологів (ISRRT), Всесвітньої федерації ультразвуку в медицині та біології (WFUMB) тощо, у черговий раз утверджуємося в думці, що саме фахівці з медичної радіології, і насамперед медичні фізики можуть стати основною рушійною силою для покращення культури безпеки в медицині загалом. IOMP практично з дня свого заснування виступає посередником і учасником співпраці між ВООЗ і МАГАТЕ у розбудові позитивної культури радіаційної безпеки в медичній галузі. Результатом цієї співпраці серед іншого є видання цього року інструкції для постачальників медичних послуг з підвищення культури радіаційної безпеки в охороні здоров'я (WHO et al., 2024).

Проблемами культури безпеки ми переймаємось починаючи з 2015 року. На нашу думку, уже є потреба підвести підсумки цієї роботи та оцінити її ефективність.

Метою публікації став аналіз результатів нашої діяльності з удосконалення культури безпеки у медичній галузі та оцінювання впливу цих напрацювань на вітчизняну медичну практику.

Методи

Зазначається перелік матеріалів і обладнання, використаних у роботі, з коротким описом їхніх технічних характеристик; опис методів / методик виконання дослідження / експерименту, у тому числі методів статистичної обробки наукових даних. Матеріалом дослідження слугували наші попередні тематичні публікації, опрацьовані методичні та навальні-методичні розробки, нормативна база і звітні матеріали центральних органів державної влади щодо питань безпеки в охороні здоров'я. У роботі було використано такі методи досліджень: бібліографічний, аналітичний, описової статистики.

Результати

Упродовж зазначеного вище періоду за безпековою тематикою ми виконали три науково-дослідні роботи й одна НДР наразі перебуває на етапі завершення. Дві із цих робіт профінансовані НАМН України, а дві МОЗ України. У ході наукових досліджень з використанням триангуляційного підходу було всебічно оцінено стан культури безпеки у вітчизняній системі охорони здоров'я і в цілому визнано її реактивний характер (Яворовський та ін., 2023а, с. 4–10). При цьому ідентифіковано основні недоліки культури безпеки у вітчизняному лікарняному середовищі, серед яких: визначено недостатню увагу керівної ланки галузі до проблем безпеки медичного персоналу та пацієнтів; неналежний облік інцидентів безпеки у лікарняних закладах; недостатню поінформованість медичного персоналу про безпекові проблеми на робочих місцях; недостатню підготовку медичного персоналу з питань безпеки пацієнтів; превалювання в медичній галузі культури реагування на помилкові дії медичного персоналу, заснованої на принципі "спіймати та покарати" – так звану несправедливу культуру безпеки. Остання проблема у цьому переліку є ключовою. На наше

переконання, саме через таку несправедливу (репресивну) культуру безпеки близько 80 % вітчизняних медичних працівників побоюються звітувати про несприятливі події та інциденти безпеки.

У ході наукових досліджень серед іншого нами науково обґрунтовано парадигму безпечного лікарняного середовища, описано його структурну модель, котра містить всі безпекові складові, а саме: безпеку пацієнтів; безпеку та гігієну праці медичних працівників; захищеність джерел небезпеки ЗОЗ, матеріальних цінностей, персоналу, пацієнтів у повсякденних умовах; стійкість ЗОЗ до надзвичайних ситуацій; екологічну безпеку (Скалецький та ін., 2019, с. 82–85).

У наших роботах (Яворовський та ін., 2021a, с. 23–33) також набули подальшого розвитку методологічні підходи до формування безпечного лікарняного середовища через лідерство перших осіб у питаннях безпеки, зацікавленість співробітників у безпечних моделях поведінки і відкритих дискусіях за безпековою тематикою, оптимізацію наявних сил і засобів безпекового спрямування, формування детального інформаційного підґрунтя для запровадження ризик-орієнтованого підходу (Яворовський та ін., 2021b) інших сучасних інструментів ефективного управління безпекою пацієнтів та медичного персоналу (Яворовський та ін., 2022). Також на підставі узагальнення результатів досліджень і розробок запропоновано концептуальні підходи до формування Стратегії попередження дефектів надання медичної допомоги у вітчизняній системі охорони здоров'я (Сердюк, Скалецький, & Риган, 2020, с. 4–11). Були надані пропозиції в частині культури безпеки до проєкту Закону України "Про безпеку праці та здоров'я працівників". Підготовлено також проєкт Указу Президента України "Про день безпеки пацієнтів", який за підтримки профільного комітету Верховної Ради України набув чинності в 2019 р.

Загалом з питань безпеки в охороні здоров'я було опубліковано понад 50 наукових праць, із них більше 10 – у наукових виданнях Scopus / WoS, а також інформаційних та методичних документах. Окремі напрацювання адаптовано у навчально-методичних матеріалах та підручниках за нашим авторством. За матеріалами досліджень підготовлено та захищено у 2024 р. дисертацію на здобуття наукового ступеня доктора медичних наук на тему: Медико-соціальне обґрунтування функціонально-організаційної моделі системи безпечного лікарняного середовища.

Для обговорення результатів наших досліджень разом з Всеукраїнською радою захисту прав та безпеки пацієнтів було організовано і проведено близько 10 науково практичних конференцій. Слід окремо зазначити науково-практичну конференцію в м. Дніпрі у 2017 р., яка викликала значний резонанс у професійному медичному середовищі. Науково-практична конференція в Національному медичному університеті імені О.О. Богомольця до Дня безпеки пацієнтів стала щорічною, а коло її учасників з кожним роком розширюється.

Однак резолюції тематичних комунікативних заходів, переважна більшість інших наших напрацювань та пропозицій щодо формування безпечного лікарняного середовища залишаються поки що поза увагою Міністерства охорони здоров'я України. На наш проєкт вищезазначеного Указу Президента України, який ми подали свого часу до МОЗ України, була підготовлена відповідь, суть якої зводилась до того, що проблеми безпеки не на часі.

Певною мірою, як реакція на нашу наукову активність у безпековій сфері, Центр громадського здоров'я МОЗ України в 2021 р. провів визначення одномоментної розповсюдженості інфекційних захворювань, пов'язаних з наданням стаціонарної медичної допомоги (ІПНМД) (Центр громадського здоров'я..., 2021). Встановлено, що станом на 2019 рік показник поширеності ІПНМД становив 0,035 %, а виявилось за даними цієї роботи – 5,7 %. Тобто в Україні проблему недооцінено, оскільки офіційно реєструється лише один із 160 випадків таких інфекцій. Не буде грубою помилкою стверджувати, що аналогічне співвідношення існує між офіційно зареєстрованими та фактичними рівнями за іншими дефектами медичної допомоги.

Зважаючи на актуальність проблеми, МОЗ України оперативно видав наказ "Про організацію профілактики інфекцій та інфекційного контролю в закладах охорони здоров'я та установах / закладах надання соціальних послуг" № 1614 від 03.08.2021. У цьому нормативному документі навіть зроблено спробу формування культури гігієни рук у лікарняних закладах. Але про культуру гігієни рук згадується лише в одному із додатків документа, а не в його основній частині. Це свідчить про те, що автори документа створення такої культури делегують не керівній ланці, від якої в основному залежить успіх у цій справі, а рядовим виконавцям, можливості яких впливати культуру безпеки вкрай обмежені. У цьому ж документі правильно вказується, що "культура дотримання гігієни рук є *лише* (авт.) складовою культури безпеки закладу охорони здоров'я". Іншими словами, не можна змінити ставлення до окремої безпекової складової, не переймаючись культурою безпеки в лікарні загалом. І зрештою, чи може позитивно вплинути на частоту виникнення госпітальних інфекцій культура гігієни рук, якщо навіть у вітчизняних столичних клінічних лікарнях вентиляція не функціонує (Яворовський та ін., 2023а, с. 4–10). Тобто маємо очевидний формальний безсистемний підхід до реагування на важливу безпекову проблему.

За даними Державної інспекції ядерного регулювання України (ДІЯРУ) у період з 2014 по 2018 рр. в Україні було офіційно зареєстровано 59 випадків променевих уражень онкопацієнтів (Плачков, 2019). За аналогією з ІПНМД, щоб встановити реальну кількість таких випадків, помножимо ці 59 випадків навіть не на 160, а на 100. Отримаємо цифру, яка показує, що Чорнобильська катастрофа на тлі ситуації у променевій терапії – незначна подія. І це знову ж таки не буде перебільшенням, оскільки за даними Інституту медичної радіології ім. С.П. Григор'єва НАМН України, який у співпраці з ВООЗ та МАГАТЕ з 1998 року здійснює незалежний аудит якості дозиметричного

калібрування гамма-терапевтичних струменів методом термолюмінесцентної дозиметрії, в окремі роки половина учасників аудиту показали, що вони до пухлини-мішені доводять дозу або вищу, або нижчу за оптимальну. І масштаби наслідків такої якості променевої терапії ми оцінювали у своїх попередніх публікаціях (Пилипенко та ін., 2015, с. 204–214). Однак навіть після цієї публікації нічого принципово в нашій променевій терапії не змінилось, окрім як розпочато впровадження у практику застосування міжнародного протоколу МАГАТЕ "Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy: An International Code of Practice for Dosimetry based on Standards of Absorbed Dose to Water (TRS-398)", що сприятиме запровадженню єдиного підходу до визначення поглиненої дози при дистанційній променевій терапії та можливо підвищить точність калібрування апаратів. Але ж доведення дози до пухлини-мішені – це лише один із понад 10-ти етапів променевої терапії, що впливають на її якість. ДІЯРУ стверджує, що заходи радіаційного захисту онкохворих при терапевтичному опроміненні вживаються повільно, і то лише під натиском Держатомрегулювання та її територіальних органів шляхом видачі приписів і встановлення ліцензійних умов (Плачков, 2019).

Зрештою запровадити культуру радіаційної безпеки в медичній радіології, спираючись на вищевказану інструкцію ВООЗ (WHO et al., 2024), також навряд чи вдасться, якщо не буде політичної волі щодо зміни ставлення до безпеки у медичній сфері загалом. Однак із чогось потрібно розпочинати. Після 2020 року, коли збігли терміни дії Концепції управління якістю медичної допомоги в галузі охорони здоров'я в Україні (наказ МОЗ України № 454 від 01.08.2011) та відповідного Плану заходів, питання якості і безпеки медичної допомоги сьогодні залишилися поза системною увагою МОЗ України. Це підтверджує і відсутність реакції Міністерства на заклик ВООЗ долучитися до "Глобального плану дій із забезпечення безпеки пацієнтів на 2021–2030 рр."

Попри те що медична сфера визнана серед всіх сфер економічної діяльності однією з найнебезпечніших за несмертельним травматизмом серед інших сфер економічної діяльності, у МОЗ України нормативна база щодо безпеки і гігієни праці охорони праці медичних працівників безнадійно застаріла, а також у міністерстві відсутній підрозділ, який би опікувався створенням більш безпечних та здорових умов праці медичних працівників (Яворовський та ін., 2021a, с. 23–33). Слід нагадати, що темою Всесвітнього дня безпеки пацієнтів у 2020 р. була: "Безпека медичних працівників – пріоритет для безпеки пацієнтів".

Проведене нами повторне оцінювання культури безпеки пацієнтів і персоналу через 7 років від розпочатих досліджень (Яворовський та ін., 2023b, с. 113–120) не виявило хоча б якихось позитивних зрушень у лікарняних закладах у ставлення адміністрації та медичного персоналу до питань безпеки.

Дискусія і висновки

1. Проблеми безпеки у вітчизняній системі охорони здоров'я є надзвичайно актуальними в медичному та соціально-економічному аспекті. Вони вимагають з боку держави невідкладного втручання.

2. У МОЗ України зроблено певні спроби розвивати культуру безпеки лише за окремим напрямом (культура дотримання гігієни рук), у той час як такий підхід не охоплює інших безпекових проблем, які існують в ЗОЗ.

3. Єдиний спосіб розпочати незворотний поступ на шляху до розбудови безпечного лікарняного середовища полягає в тісній співпраці медичного менеджменту, медичної громадськості та медичної науки.

Внесок авторів: Юрій Скалецький – перевірка, концептуалізація, методологія, написання проєкту; Олександр Яворовський – ведення, адміністрування проєкту, курація даних; Роман Брухно – візуалізація, написання, рецензування та редагування; Михайло Риган – написання – візуалізація, редагування; Сергій Кравченко – написання – формальний аналіз, редагування.

Подяки, джерела фінансування. Стаття є частиною науково-дослідної роботи, яка фінансується МОЗ України "Наукове обґрунтування методологічного підґрунтя та розробка алгоритму з оцінки культури безпеки у медичних закладах в умовах надзвичайних ситуацій" (Державний реєстраційний номер: 0123U101056).

Список використаних джерел

Плалков, Г. (2019). *Доповідь про стан ядерної та радіаційної безпеки в Україні в 2018 році*. Державна інспекція ядерного регулювання України. https://snriu.gov.ua/storage/app/sites/1/docs/shorichna_dopovid_pro_stan_yadernou_ta_radiacijnoi_bezpeky/_2018_%D1%82%D0%B5%D0%B A%D1%81%D1%82_PDF.pdf

Пилипенко, М.І., Стадник, Л.Л., Риган, М. М., Скалецький, Ю.М., & Шальопа, О.Ю. (2015). Медико-соціальні наслідки проблем безпеки пацієнтів в онкорадіології. *Проблеми радіаційної медицини та радіобіології*, 20, 204–214.

Сердюк, А.М., Скалецький, Ю.М., & Риган, М.М. (2020). Концепція формування стратегії попередження дефектів надання медичної допомоги у вітчизняній системі охорони здоров'я. *Довкілля та здоров'я*, 1(94), 4–11.

Скалецький, Ю.М., Риган, М.М., Протас, С.В., & Штаюра, А.М. (2019). Щодо безпечного лікарняного середовища як нової парадигми мінімізації ризиків для персоналу та пацієнтів. У *Медична фізика – сучасний стан, проблеми, шляхи розвитку. Новітні технології : матеріали VIII Міжнародної конференції* (с. 82–85).

Центр громадського здоров'я МОЗ України. (2021). *Визначення одномоментної розповсюдженості інфекційних захворювань, пов'язаних з наданням медичної допомоги, та використання антимікробних препаратів в закладах охорони здоров'я, що надають цілодобову стаціонарну допомогу в Україні в 2021 році*. <https://phc.org.ua/naukova-diyalnist/doslidzhennya/inshi-doslidzhennya/viznachennya-odnomomentnoi-rozpovsyudzenosti-infekciynikh-khvorob-povyazanih-z-nadannjam-medichnoi-dopomogi-ta-vikoristannya-antimikrobnikh-preparativ-v-zoz>

Яворовський, О.П., Риган, М.М., Іванько, О.В., Скалецький, Ю.М., & Брухно, Р.П. (2021a). Система забезпечення безпеки персоналу і пацієнтів у лікарняних закладах: стратегія удосконалення. *Український журнал військової медицини*, 22, 23–33.

Яворовський, О.П., Варивончик, Д.В., Скалецький, Ю.М., Брухно, Р.П., Зінченко, Т.О., & Риган М.М. (2021b). *Управління виробничими ризиками в закладі охорони здоров'я для створення безпечного лікарняного середовища: методичні рекомендації*. Друкарня НМУ.

Яворовський, О.П., Скалецький, Ю.М., Брухно, Р.П., Риган, М.М., & Лобода, Т.В. (2022). *Запровадження системи обліку та аналізу випадків неналежного надання медичної допомоги: методичні рекомендації*. Друкарня НМУ.

Яворовський, О.П., Науменко, О.М., Скалецький, Ю.М., Брухно, Р.П., Риган, М.М., Іванько, О.В., Михайленко, П.М., Зінченко, Т.О., & Банковська, Н.В. (2023a). Оцінка культури безпеки у вітчизняній охороні здоров'я: Триангуляційний підхід. *Довкілля та здоров'я*, 4(109), 4–10. <https://doi.org/10.32402/dovkil2023.04.004>

Яворовський, О.П., Скалецький, Ю.М., Брухно, Р.П., Іванько, О.В., Кравченко, С.В., Бугро, В.І., Шкурба, А.В., Зінченко, Т.О., & Козак, Н.Д. (2023b). Порівняльний аналіз динаміки стану культури безпеки пацієнтів у лікарняних закладах України та США в контексті формування безпечного лікарняного середовища. *Клінічна та профілактична медицина*, 6(28), 113–120. <https://doi.org/10.31612/2616-4868.6.2023.14>

WHO, IAEA, IOMP, IRPA. (2024). *Enhancing in health care Radiation safety culture. Guidance for health care providers*. World Health Organization. <https://iris.who.int/handle/10665/378117>

References

Plachkov, G. (2019). *Report on the state of nuclear and radiation safety in Ukraine in 2018*. State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine [in Ukrainian] https://snriu.gov.ua/storage/app/sites/1/docs/shorichna_dopovid_pro_stan_yadernou_ta_radiacijnoi_bezpeky/_2018_%D1%82%D0%B5%D0%BA%D1%81%D1%82_PDF.pdfPublic Health Center of the Ministry of Health of Ukraine. (2021). *Determination of the instantaneous prevalence of infectious diseases associated with the provision of medical care and the use of antimicrobial drugs in health care facilities providing round-the-clock inpatient care in Ukraine in 2021* [in Ukrainian]. <https://phc.org.ua/naukova-diyalnist/doslidzhennya/inshi-doslidzhennya/viznachennya-odnomomentnoi-rozpovsyudzhnosti-infekciynikh-khvorob-povyazanih-z-nadannyam-medichnoi-dopomogi-ta-vikoristannya-antimikrobnikh-preparativ-v-zoz>

Pylypenko, M.I., Stadnyk, L.L., Ryhan, M.M., Skaletskyi, Yu.M., & Shalopa, O. Yu. (2015). Medical and social consequences of patient safety problems in oncoradiology. *Problems of radiation medicine and radiobiology*, 20, 204–214 [in Ukrainian].

Serdiuk, A.M., Skaletskyi, Yu.M., & Ryhan, M.M. (2020). Concept of forming a strategy for warning defects of providing medical care in the national health care system. *Environment and health* 1(94), 4–11 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32402/dovkil2020.01.004>

Skaletskyi, Yu.M., Ryhan, M.M., Protas, S.V., & Shtaiura, A.M. (2019). Towards a safe hospital environment as a new paradigm for minimizing risks for staff and patients. In *Medical Physics – Current State, Issues, Development Directions. New Technologies: Proceedings of the VIII International Conference* (pp. 82–85) [in Ukrainian].

WHO, IAEA, IOMP, IRPA. (2024). *Enhancing in health care Radiation safety culture. Guidance for health care providers*. World Health Organization. <https://iris.who.int/handle/10665/378117>

Yavorovskyi, O.P., Ryhan, M.M., Ivanko, O.V., Skaletskyi, Yu.M., & Brukhno, R.P. (2021a). The system of ensuring the safety of personnel and patients in hospitals: a strategy for improvement. *Ukrainian Journal of Military Medicine*, 22, 23–33 [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.46847/ujmm.2020.2\(1\)-024](https://doi.org/10.46847/ujmm.2020.2(1)-024)

Yavorovskyi, O.P., Varyvonchuk, D.V., Skaletskyi, Yu.M., Brukhno, R.P., Zinchenko, T.O., & Ryhan, M.M. (2021b). *Management of industrial risks in a health care facility to create a safe hospital environment: methodological recommendations*. NMU printing house [in Ukrainian].

Yavorovskyi, O.P., Skaletskyi, Yu.M., Brukhno, R.P., Ryhan, M.M., & Loboda, T.V. (2022). *Introduction of a system of accounting and analysis of cases of improper provision of medical care: methodological recommendations*. NMU printing house [in Ukrainian].

Yavorovskyi, O.P., Naumenko, O.M., Skaletskyi, Yu.M., Brukhno, R.P., Ryhan, M.M., Ivanko, O.V., Mykhailenko, P.M., Zinchenko, T.O., & Bankovska, N.V. (2023a). Assessment of safety culture in domestic health care: Triangulation approach. *Environment and health*, 4(109), 4–10 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32402/dovkil2023.04.004>

Yavorovskyi, O.P., Skaletskyi, Yu.M., Brukhno, R.P., Ivanko, O.V., Kravchenko, S.V., Buhro, V.I., Shkurba, A.V., Zinchenko, T.O., & Kozak, N.D. (2023b). Comparative analysis of patient safety culture dynamics in Ukraine and the USA healthcare facilities reference to establishing safe hospital environment. *Clinical and preventive medicine*, 6(28), 113–120 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31612/2616-4868.6.2023.14>

Отримано редакцією збірника / Received: 29.07.24

Прорецензовано / Revised: 19.08.24

Схвалено до друку / Accepted: 01.10.24

Yuriy SKALETISKYI¹, DSc (Med.), Prof.
ORCID ID: 0000-0001-7527-6827
e-mail: syn1953@ukr.net

Oleksandr YAVOROVSKIY², DSc (Med.), Prof.
ORCID ID: 0000-0002-4573-8039
e-mail: kgpnmu@ukr.net

Roman BRUKHNO², PhD (Med.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0002-6666-397X
e-mail: bruhnroman@ukr.net

Mykhailo RYGAN³, DSc (Med.)
ORCID ID: 0000-0003-1244-9801
e-mail: syn1953@ukr.net

Sergiy KRAVCHENKO¹, PhD Student
ORCID ID: 0000-0002-3097-8136
e-mail: syn1953@ukr.net

¹SI "O.M. Marzeiev Institute for Public Health of the NAMS of Ukraine", Kyiv, Ukraine

²Bogomolets National Medical University, Kyiv, Ukraine

³National University of Physical Education and Sport of Ukraine, Kyiv, Ukraine

COOPERATION OF DOMESTIC SCIENCE AND MEDICAL PRACTICE IN FORMING A CULTURE OF SAFETY IN THE MEDICAL INDUSTRY

Introduction. *The purpose of the publication was to analyze the results of our activities to improve the safety culture in the medical field and assess the impact of these developments on domestic medical practice.*

Methods. *In the course of the work, we used our previous thematic publications, methodological developments, regulatory framework and reporting materials of central state authorities on security issues in health care of Ukraine.*

Results. *We have established that safety issues in the domestic health care system are extremely relevant in medical and socio-economic terms. They demand urgent intervention from the state. In particular, we have comprehensively assessed the state of safety culture in the domestic health care system and generally recognized its reactive nature. In the Ministry of Health of Ukraine, certain attempts have been made to develop a safety culture only in a separate direction (the culture of observing hand hygiene), while this approach does not cover other non-specific problems that exist in health care facilities.*

Conclusions. *The only way to begin irreversible progress towards building a safe hospital environment is through the close cooperation of medical management, the medical community, and medical science.*

Keywords: *safety culture, health care facilities, medical workers.*

Автори Ю. Скалєцький, О. Яворовський, Р. Брухно, М. Риган та С. Кравченко заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors Y. Skaletskyi, O. Yavorovskyi, R. Brukhno, M. Rygan and S. Kravchenko declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

Антон ОСЬМУХА^{1,2}, інж.-радіолог
e-mail: onrof@ukr.net

Фаїна КУЛІКОВА^{1,2}, д-р мед. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0002-0857-1508
e-mail: 19.11.faina@gmail.com

Лариса ЦАРЕНКО³
e-mail: dnepr_insp@i.ua

Лариса КАЛИУШКО³
e-mail: dnepr_insp@i.ua

¹Обласний Центр радіаційної безпеки та медичної радіології, Дніпро, Україна

²КП "Дніпропетровська обласна клінічна лікарня ім. Мечникова" ДОР",
Дніпро, Україна

³Центральна інспекція з ядерної та радіаційної безпеки, Дніпро, Україна

С-ДУГИ – КОРИСТЬ, ШКОДА, ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ

Вступ. Збільшення пацієнтів з вогнепальними та мінно-вибуховими травмами на тлі військових дій призвело до необхідності більш широкого використання С-подібних рентгенівських систем. Метою дослідження є визначення особливостей ефективного та безпечного використання С-подібних систем у рентгеноопераційних із мінімізацією дозового навантаження на медичний персонал.

Методи. Проведено дозиметричні вимірювання з використанням 39 одиниць С-подібних рентгенівських систем 15-ти різних модифікацій. Виміряно потужності дози опромінювання персоналу на робочих місцях.

Результати. Проаналізовано результати за такими характеристиками: потужність дози, що отримується на робочому місці персоналу, на рівні голови, грудей, гонад і ніг; співвідношення режиму експозиції до радіаційного виходу та отриманої персоналом дози; різниця між потужностями доз, які були виміряні на рівні різних частин тіла персоналу відповідно до напрямку пучка випромінювання; аналіз результатів радіаційного контролю, виміряних значень потужності дози, наведених до значення стандартного робочого навантаження згідно з ДСанПіН 6.6.3-150-2007.

Висновки. За отриманими вимірами було обчислено потужності дози. Результати були порівняні з регламентованими (13 мкЗв/год) і вразили своєю небезпекою – в окремих випадках допустима потужність дози була на рівні 32.8 мкЗв/год. Таким чином, вважаємо, що під час роботи з С-подібними рентгенівськими системами та рентген-операційними засобами персоналу необхідно використовувати індивідуальний захист та рентгенозахисні ширми.

Ключові слова: С-подібні рентгенівські системи, дозове навантаження, потужність дози опромінювання.

Вступ

Наявність великої кількості пацієнтів з вогнепальними та мінно-вибуховими травмами значно збільшила сферу використання С-подібних рентгенівських систем. За минулі два роки переважна більшість міських та

© Осьмуха Антон, Кулікова Фаїна, Царенко Лариса, Калиушко Лариса, 2024

обласних лікувальних закладів і практично всі районні лікарні Дніпропетровської області отримали ці системи. Дніпропетровський обласний Центр радіаційної безпеки та медичної радіології проводить радіаційний контроль в усіх лікувальних закладах Дніпропетровської області. Тож на підставі дослідження великої кількості С-подібних рентгенівських систем різних виробників та років випуску стала наявною необхідність чітко визначити умови їх безпечного використання. У доступній літературі ми не знайшли будь-яких аналітичних робіт на цю тему. Усе, що наразі є у вільному доступі стосовно використання С-подібних рентгенівських систем, – це більш-менш детальна інформація на сайтах виробників обладнання з питань, для чого саме призначені ті чи інші С-подібні рентгенівські системи.

Методи

У процесі дослідження було проведено дозиметричні вимірювання під час променевих обстежень з використанням 39-ти одиниць С-подібних джерел іонізуючого випромінювання 15-ти модифікацій. Основними елементами С-подібної системи (SYM_USO_EN_R14-Revision 14, 2022. User manual) є: рентгенівська трубка, електронно-оптичний перетворювач з підсилювачем рентгенівського зображення, генераторний пристрій, С-подібний штатив, пульт керування, робоча станція лікаря з моніторами для виведення на екран отриманого зображення. Основною відмінністю цих систем від звичайних пересувних рентгенівських апаратів є поворотний в усі напрямки С-подібний штатив, на якому жорстко закріплені рентгенівська трубка й електронно-оптичний перетворювач зображення. Це дозволяє зробити рентгенівське дослідження швидко та зручно майже в будь-якій площині та напрямку випромінювання. Окрім графічного режиму роботи С-подібні системи також вигідно відрізняються можливістю використання скопичного режиму досліджень, як безперервного, так і з імпульсним іонізуючим випромінюванням, задля зменшення дозового навантаження на персонал та пацієнта.

Під час нашого дослідження були проведені вимірювання потужності дози опромінення персоналу на робочих місцях згідно з методикою за ДСанПІН 6.6.3-150-2007 (Міністерство охорони здоров'я України, 2007). Вимірювання виконувалися за всіма рентгенозахисними огорожувальними конструкціями, що обмежують зону впливу іонізуючого випромінювання, а також на робочих місцях персоналу категорії А. Під час використання С-подібних систем робоче місце лікаря було розташоване як в зоні дії іонізуючого випромінювання, так і в деяких випадках взагалі безпосередньо біля джерела та пацієнта. Після багаторазового спілкування з хірургічними командами, що використовують у своїй практиці С-подібні системи, з'ясувалися особливості застосування цих систем у реальних умовах. Досить часто рентгенологічні дослідження виконуються не лише в безпосередній близькості до джерела та пацієнта, а лікарям доводиться тримати чи притримувати пацієнта при дослідженні. Це призводить до того, що певний персонал періодично перебуває в найнесприятливіших радіаційних умовах, під впливом дози максимальної потужності розсіяного, а подекуди і прямого іонізуючого випромінювання.

Для чистоти методики ми намагались створити максимально ідентичні умови для всіх апаратів, що були досліджені, а саме: значення анодної напруги, фантом, що використовувався (циліндричний водонаповнений фантом діаметра 150 мм), відстань від джерела випромінювання, напрямок випромінювання, висота встановлення фантому над рівнем підлоги. Ми дослідили 15 моделей С-подібних рентгенівських систем, різних модифікацій і заводів-виробників, що не повторювались. Для оцінювання результатів радіаційного контролю згідно з п. 9.26 наказу № 294 від 04.06.2007 до ДСанПіН 6.6.3-150-2007 виміряні значення потужності дози проводили до значення стандартного робочого навантаження, мкЗв/год:

$$Dn = \frac{W}{1800 * I_{\text{вимір}}} * D_{\text{вимір}},$$

де Dn – значення потужності дози, приведене до стандартного робочого навантаження апарата; $D_{\text{вимір}}$ – виміряне значення потужності дози; W – робоче навантаження (мА * хв/тижд.) (п. 3.7 та 8.1 наказу № 294 від 04.06.2007 р. до ДСанПіН 6.6.3-150-2007); 1800 – час роботи персоналу категорії А, хв/тижд.; $I_{\text{вимір}}$ – значення струму, установлене під час вимірювання, мА.

Результати

Для зручності сприйняття дані, після обробки, були відображені у зведеній табл. 1.

Таблиця 1

**Потужність дози для персоналу категорії А
під час використання різних С-подібних рентгенівських систем**

№	Значення струму, мА	Виміряна потужність дози на рівні, мкЗв/год				Потужність дози мкЗв/год	
		голови	грудей	гонад	ніг	Dn	Допустима потужність дози
1	20	151,6	250	230	154,8	1,4	13,0
2	5	13,2	116,2	94,4	76,8	2,56	13,0
3	7	292	283	197	202	4,64	13,0
4	10	434	548	427	416	6,09	13,0
5	10	444	556	439	426	6,17	13,0
6	4	233	305	271	112	8,47	13,0
7	7	594	613	413	424,2	9,75	13,0
8	0,9	93	75	70	68	11,5	13,0
9	3	319	261	248	223	11,8	13,0
10	10	911	1150	897	874	12,65	13,0
11	1,4	152	163	145	67	12,88	13,0
12	2,7	379	386	350	275	15,93	13,0
13	1,5	219	228	215	187	16,2	13,0
14	1,5	542	610	466	224	16,94	13,0
15	2	490	590	440	293	32,8	13,0

Після розгляду наведених в табл. 1 даних стає зрозумілим, що робота з С-подібними рентгенівськими системами за умови постійного щоденного використання не цілком безпечна для персоналу. І єдиною відповіддю на запитання, як працювати з С-подібними рентгенівськими системами без негативних наслідків для здоров'я персоналу, є, на наш погляд, використання в рентген-операційних засобів індивідуального захисту (ЗІЗ) від іонізуючого випромінювання та великих рентгенозахисних ширм.

ЗІЗ розрізняють за їхніми захисними властивостями і матеріалами, з яких вони виготовлені. Для вибору матеріалу та свинцевого еквівалента ЗІЗ слід також враховувати обмежені фізичні можливості людини. Чим кращий захист, тим більша вага захисного засобу. Зважаючи на те, що персонал повинен перебувати у цих засобах годинами, вважаємо за доцільне використання саме ЗІЗ на вініловій основі зі свинцевим еквівалентом 0,5 мм. Свинцевий еквівалент 0,5 мм не здатний повністю усунути вплив іонізуючого випромінювання на тіло людини, але він здатен у десятки разів знизити потужність отриманої дози. Таким чином, доцільний такий алгоритм дій персоналу категорії А: лікар, що притримує пацієнта під час обстеження, повинен використовувати максимальний набір наявних ЗІЗ, що вкривають максимальну площу поверхні тіла, а весь інший персонал, за можливості, під час ввімкнення високої напруги, окрім використання ЗІЗ, повинен захистити себе за допомогою великої захисної ширми. Свинцевий еквівалент захисної ширми краще обирати максимально доступний, виходячи з можливостей суб'єкта господарювання, але не менш ніж 1 мм.

Дискусія і висновки

Зважаючи на перевищення потужності дози значної кількості перевірених С-подібних рентгенівських систем, вважаємо за необхідне використання в рентген-операційних ширм рентгенозахисних загального використання зі свинцевим еквівалентом не менш ніж 1 мм та засобів індивідуального захисту на вініловій основі зі свинцевим еквівалентом 0,5 мм.

Внесок авторів: Антон Осьмуха – концептуалізація, методологія, валідація даних; Фаїна Кулікова – концептуалізація, методологія, написання – оригінальна чернетка; Лариса Царенко – концептуалізація, написання – перегляд і редагування; Лариса Калиушко – написання – перегляд і редагування.

Подяки, джерела фінансування. Висловлюємо щирі подяки генеральному директору КП "Дніпропетровська обласна клінічна лікарня ім. Мечникова" професору Сергію РИЖЕНКУ та відповідальному за радіаційну безпеку в лікарні медичному директору, доктору медичних наук Сергію ТИМЧУКУ за сприяння роботі обласного Центру радіаційної безпеки та медичної радіології і можливість виконання досліджень на базі лікарні.

Список використаних джерел

Міністерство охорони здоров'я України. (2007). *Про затвердження Державних санітарних правил і норм "Гігієнічні вимоги до влаштування та експлуатації рентгенівських кабінетів і проведення рентгенологічних процедур"* (наказ від 04.06.2007 р. № 294, ред. від 14.11.2017). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1256-07#Text>

References

Ministry of Health of Ukraine. (2007). *On the approval of the State sanitary rules and norms "Hygienic requirements for the arrangement and operation of X-ray rooms and the conduct of X-ray procedures"* (order dated June, 04, 2007 No. 294, Rev. Dated November, 14, 2017) [in Ukrainian]. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1256-07#Text>

Отримано редакцією збірника / Received: 04.08.24

Прорецензовано / Revised: 03.09.24

Схвалено до друку / Accepted: 01.10.24

Anton OSMUKHA^{1,2}, Engineer-Radiologist
e-mail: onrof@ukr.net

Faina KULIKOVA^{1,2} DSc (Med.)
ORCID ID: 0000-0002-0857-1508
e-mail: 19.11.faina@gmail.com

Larisa TSARENKO³
e-mail: dnepr_insp@i.ua

Larisa KALIUSHKO³
e-mail: dnepr_insp@i.ua

¹ Regional Center for Radiation Safety and Medical Radiology, Dnipro, Ukraine

² Dnipropetrovsk Regional Clinical Hospital, Dnipro, Ukraine

³ Central Inspection for Nuclear and Radiation Safety, Dnipro, Ukraine

BENEFIT, DAMAGE AND FEATURES OF USE OF C-ARCS

Introduction. *The increase in patients with gunshot and mine-explosive injuries has led to the need for a significant increase in the use of C-shaped X-ray systems. And that's the reason for studying the features of the effective and safe use of C-shaped systems during surgical interventions with the minimization of the dose load on medical personnel.*

Methods. *Dosimetric measurements were carried out during radiation examinations using 15 different types C-shaped X-ray systems, measured radiation dose rates of personnel at workplaces.*

Results. *The analysis of the results of dosimetric measurements was carried out according to the following characteristics: the dose power received at the workplace by personnel at the level of the head, chest, gonads and legs; the ratio of the exposure mode to the radiation and dose received by the personnel; the difference between the doses that were measured at the level of different parts of the personnel's body, according to the direction of the radiation beam; analysis of the results of radiation control, measured values of the dose rate, reduced to the value of the standard workload, according to DSanPiN 6.6.3-150-2007.*

Conclusions. *Permissible dose rates were calculated based on the obtained dosimetric measurements. The results of the comparison with the regulations and shows us their danger (in some cases, the maximum permissible dose was exceeded by 2.5 times). Based on this we consider it absolutely necessary to use X-ray screens and personal protective equipment in operating rooms.*

Key words: *C-shaped X-ray systems, dose load, radiation dose rate.*

Автори А. Осьмуха, Ф. Кулікова, Л. Царенко та Л. Калиушко заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors A. Osmukha, F. Kulikova, L. Tsarenko and L. Kaliushko declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

УДК 621.384.64:614.876

DOI: <https://doi.org/10.17721/3041-1491/2024.11-16>

Дмитро БЕЛИХ¹, магістр
ORCID ID: 0000-0002-5782-9827
e-mail: do_belykh@sstc.ua

Тетяна ЛИТВИНСЬКА¹, магістр
ORCID ID: 0000-0002-3308-8526
e-mail: tv_litvinskaya@sstc.ua

Віталій ПОЛУДНЕНКО¹, магістр, наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0002-8307-6777
e-mail: va_poludnenko@sstc.ua

Ольга СІТНІКОВА¹, магістр, ст. інж.
ORCID ID: 0000-0002-0602-9731
e-mail: ol_kolodiichuk@sstc.ua

¹Державне підприємство "Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки", Київ, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ТОВЩИНИ ДЕСЯТИКРАТНОГО ОСЛАБЛЕННЯ ВИПРОМІНЮВАННЯ ВИТОКУ ВІД МЕДИЧНИХ ЛІНІЙНИХ ПРИСКОРЮВАЧІВ З ЕНЕРГІЄЮ 6 МЕВ

Вступ. З досвіду проведення державних експертиз з ядерної та радіаційної безпеки проєктів улаштування медичних лінійних прискорювачів було помічено, що товщини десятикратного ослаблення випромінювання витоку в бетоні значно відрізняються у відомих, міжнародно визнаних методиках розрахунку біологічного захисту в дистанційній променевій терапії Національної ради з радіаційного захисту та вимірювань, а також МАГАТЕ.

Методи. За допомогою методу Монте-Карло в роботі було оцінено числове значення товщини десятикратного ослаблення випромінювання витоку медичних лінійних прискорювачів з енергією випромінювання 6 МеВ для бетону і проведено аналіз розбіжності отриманої та наведених у методиках величин.

Результати. За результатами проведеного аналізу запропоновано значення товщини десятикратного ослаблення випромінювання витоку медичних лінійних прискорювачів електронів з енергією 6 МеВ, найбільш прийнятне для розрахунку стаціонарного біологічного захисту.

Висновки. Дослідження підтверджує коректність величини $T_{VL} = 279$ мм, яка може бути використана під час розрахунку біологічного захисту медичних закладів із лінійними прискорювачами електронів та застосування принципу оптимізації радіаційного захисту.

Ключові слова: товщина десятикратного ослаблення, лінійний прискорювач, радіаційна безпека, біологічний захист, метод Монте-Карло.

Вступ

Одним з ефективних сучасних методів лікування онкологічних захворювань є дистанційна променева терапія за допомогою лінійних прискорювачів електронів (медичних лінійних прискорювачів). Сьогодні в Україні такий метод

лікування активно розвивається і все більше медичних закладів встановлюють лінійні прискорювачі. Здебільшого медичні лінійні прискорювачі встановлюють в існуючих бетонних бункерах, де були розміщені гамма-терапевтичні апарати. Оскільки лінійні прискорювачі генерують випромінювання з більшою інтенсивністю й енергією, ніж гамма-терапевтичні апарати, то для таких бункерів потрібно виконати оцінювання достатності існуючого біологічного захисту. Для визначення достатності такого захисту необхідно застосовувати принцип оптимізації, що передбачає досягнення балансу між прийнятним рівнем опромінення медичного персоналу та витратами на підсилення / модернізацію існуючого захисту. У цьому сенсі важливу роль відіграють методології та методики оцінювання біологічного захисту бункерів лінійних прискорювачів. Зазначені оцінювання виконують за відомими методиками МАГАТЕ (International Atomic Energy Agency, IAEA) та Національної ради з радіаційного захисту та вимірювань США (IAEA, 2006; NCRP Report 151, 2006). Однією з основних складових у розрахунках біологічного захисту є випромінювання витоку. З досвіду використання методик (IAEA, 2006) та (NCRP Report 151, 2006) у процесі виконання державних експертиз з ядерної та радіаційної безпеки виявилось, що у цих методиках значення товщин десятикратного ослаблення (TVL) випромінювання витоку в бетоні значно відрізняються. Притому різниця значень TVL спостерігається для всіх енергій випромінювання. Ця робота присвячена вивченню TVL випромінювання витоку саме для лінійних прискорювачів з енергією випромінювання 6 MeV, оскільки вони найбільш поширені. Методика (NCRP Report 151, 2006) визначає першу та рівноважну TVL випромінювання витоку, як 340 мм та 290 мм, відповідно. У свою чергу, у методиці (IAEA, 2006) TVL зазначено 279 мм для випромінювання витоку.

Різниця у TVL випромінювання витоку значно впливає на результат розрахунку товщини захисту. Наприклад, для послаблення випромінювання витоку в 1000 разів необхідна товщина захисту з бетону становитиме 920 мм за методикою (NCRP Report 151, 2006), а за методикою (IAEA, 2006) товщина буде становити 837 мм. Наявність значної різниці в значеннях TVL у зазначених методиках є проблемою як для проектування відповідного біологічного захисту, так і для проведення державних експертиз з ядерної та радіаційної безпеки зазначених проєктів встановлення медичних лінійних прискорювачів.

Отже, проведення дослідження для визначення найбільш коректної TVL та аналіз розбіжностей дуже важливе.

Метою дослідження є визначення TVL у бетоні для випромінювання витоку медичних лінійних прискорювачів з енергією 6 MeV та проведення аналізу отриманих результатів із відомими величинами з методик (IAEA, 2006) та (NCRP Report 151, 2006). За результатами проведеного аналізу запропоновано величину TVL, яка, як вважають автори, є найбільш реалістичною для розрахунку захисту від випромінювання витоку медичних лінійних прискорювачів з енергією 6 MeV.

Методи

Визначення значень TVL виконувалося за допомогою методу Монте-Карло з використанням комп'ютерного коду PHITS (Sato et al., 2024) версії 3.32.

Першим кроком було моделювання джерела випромінювання – голівки лінійного прискорювача. Для досягнення відношення поглиненої дози за межами прямого пучка до поглиненої дози на прямому пучку, що дорівнював 0,001, підбиралася товщина захисту з вольфраму навколо мішені лінійного прискорювача. Зазначене відношення є міжнародним стандартом верхньої межі величини випромінювання витоку для медичних лінійних прискорювачів. Енергія електронів, що налітають на мішень, була прийнята такою, що дорівнює 6 MeV. Розроблену модель голівки лінійного прискорювача зображено на рис. 1.

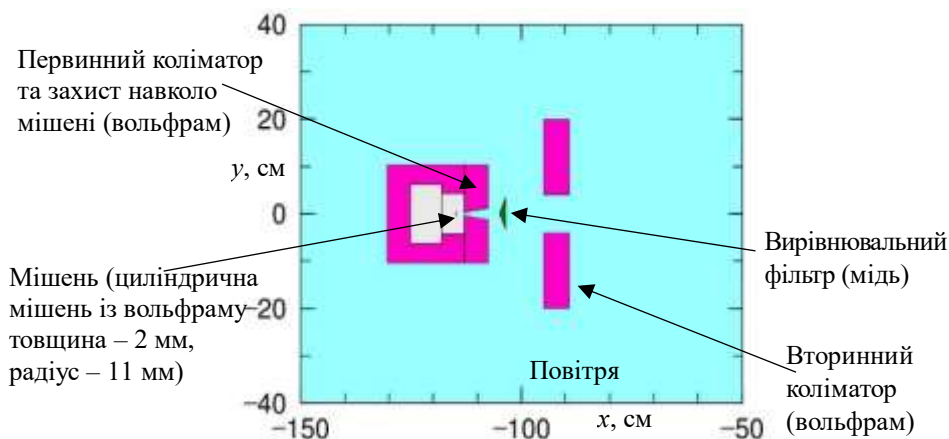


Рис. 1. Модель голівки лінійного прискорювача в комп'ютерному коді PHITS

Другим кроком було визначення спектра випромінювання витоку. Зважаючи на те, що в біологічному захисті голівки лінійного прискорювача відбувається багаторазове розсіювання випромінювання, можна вважати, що спектр випромінювання витоку на великих кутах (більше 30°) від осі первинного випромінювання не залежить від кута. На малих кутах напрямку випромінювання від осі первинного випромінювання (менше 30°) вимоги до біологічного захисту стін загалом визначаються розсіяним випромінюванням від пацієнта, тому немає сенсу досліджувати спектр випромінювання витоку на малих кутах.

Зважаючи на вищезазначене, для дослідження спектра випромінювання витоку був обраний кут 90° . Абсолютні спектри первинного випромінювання (для поглиненої дози 400 Гр/год в ізоцентрі) та випромінювання витоку в куті 90° від осі первинного випромінювання зазначено на рис. 2.

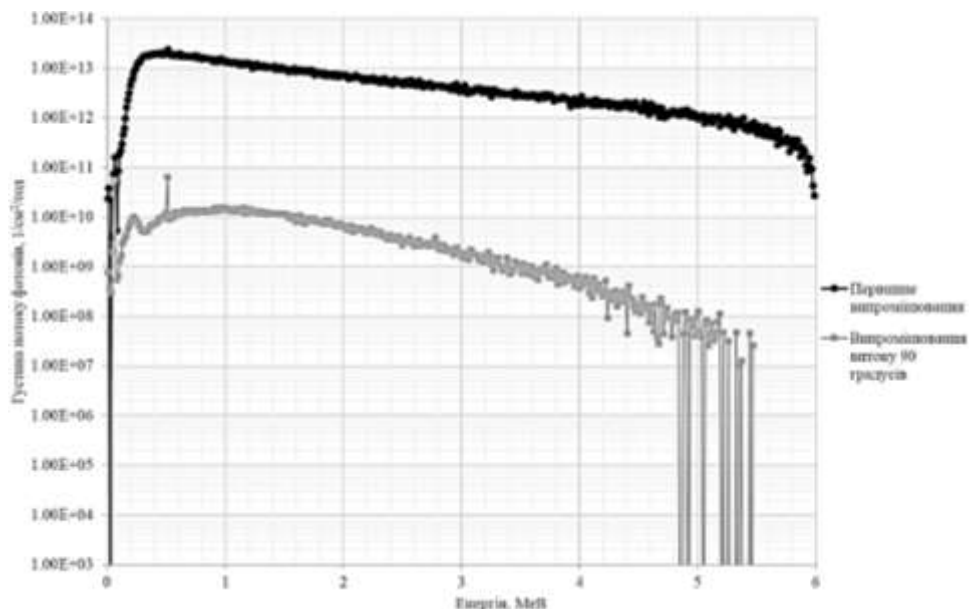


Рис. 2. Змодельовані комп'ютерним кодом PHITS спектри випромінювання

Третім кроком було визначення значення TVL випромінювання витоку в бетоні. У комп'ютерному коді PHITS (Sato et al., 2024) версії 3.32 моделювалося 10 пластин товщиною $x = 100$ мм кожна. Як налітаюче випромінювання моделювалося випромінювання витоку зі спектром, який було отримано на другому кроці (рис. 2). Кут розкриття пучка випромінювання був обраний 5° . Спочатку всі пластини були змодельовані з повітря для визначення ефективної дози без ослаблення D_0 . Ця величина використовувалась як опорна, відносно якої визначаються TVL. Далі по чергово пластини заповнювалися бетоном та визначалися відповідні ефективні дози D_i за захистом. Усі ефективні дози визначалися за допомогою коефіцієнтів перерахунку МКРЗ (ICRP, 2010). Зображення моделі визначення TVL вказано на рис. 3. Значення TVL обчислювалися за формулою

$$TVL_i = \frac{x \cdot i}{\lg \frac{D_0}{D_i}}, \quad (1)$$

де i – номер останньої пластини, яка заповнюється бетоном.

Результати

Визначені за формулою (1) значення TVL наведено в табл. 1 і на рис. 4. Отримані значення TVL для товщин 100 та 1000 мм бетону варіюються від 181,77 мм до 239,63 мм, відповідно. Значення D_i визначені з відносним стандартним відхиленням менше 2 %. Збільшення значення TVL зі збільшенням товщини бетону обумовлюється фільтрацією випромінювання (високі енергії залишаються в пучку, а малі енергії поглинаються товщою бетону) та збільшенням розсіяння випромінювання в напрямку поширення випромінювання.

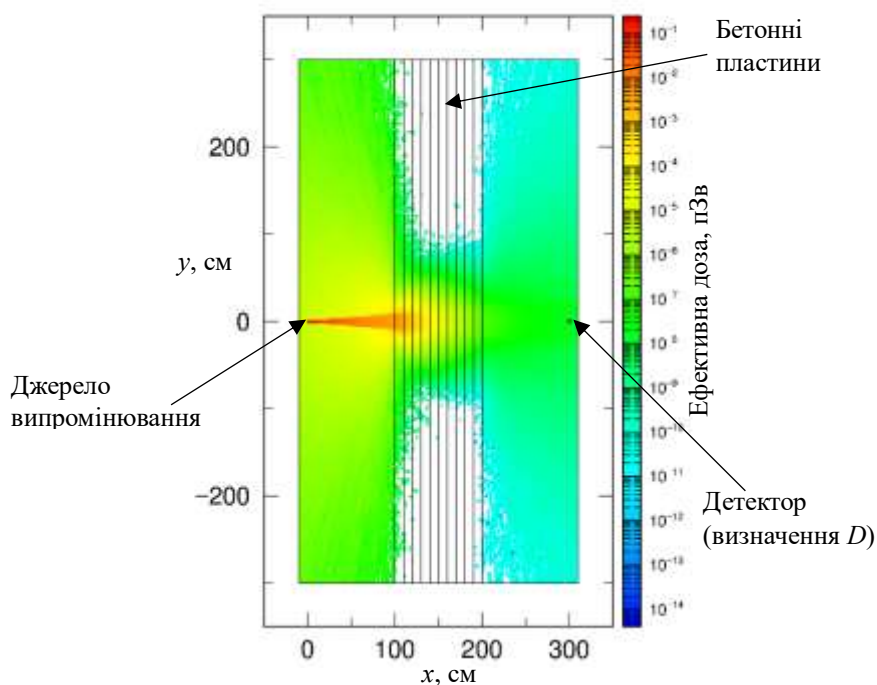


Рис. 3. Модель визначення товщини 10-кратного ослаблення випромінювання витоку (згенеровано PHITS)

Таблиця 1

Визначені товщини 10-кратного ослаблення

i	Товщина бетону, $i \cdot x$, мм	D_i , пЗв	TVL_i , мм
0	0	2,36E-03	-
1	100	6,65E-04	181,77
2	200	2,15E-04	192,22
3	300	7,76E-05	202,34
4	400	2,87E-05	208,93
5	500	1,11E-05	214,69
6	600	4,44E-06	220,12
7	700	1,85E-06	225,48
8	800	7,95E-07	230,38
9	900	3,56E-07	235,49
10	1000	1,58E-07	239,63

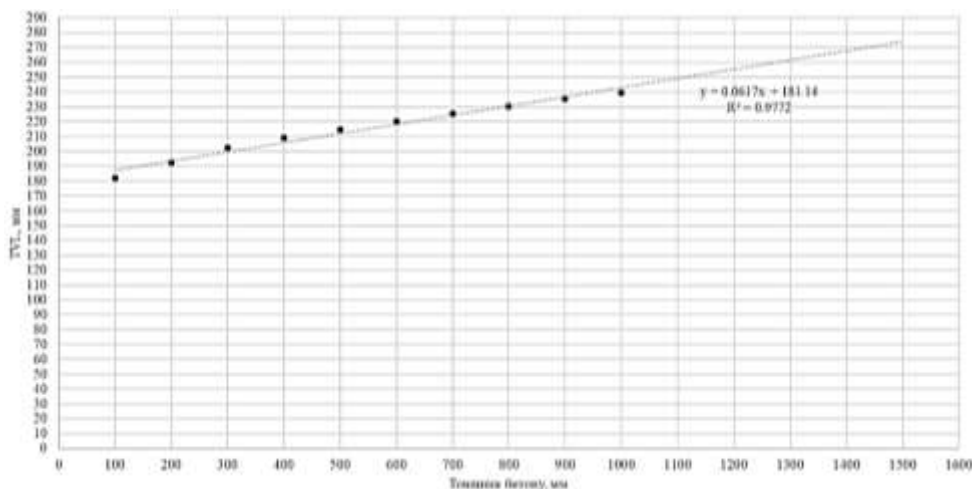


Рис. 4. Графічне зображення результатів розрахунку товщин 10-кратного ослаблення випромінювання витоку

За результатами аналізу отриманих даних, функція залежності TVL від товщини бетону має лінійний вигляд

$$\text{TVL}(x) = 0,0617 \cdot x + 181,14. \quad (2)$$

З існуючої практики проведення державних експертиз із ядерної та радіаційної безпеки проєктів встановлення медичних лінійних прискорювачів відомо, що типові товщини стін бункерів відповідають діапазону 1-2 м. Отже, доцільним буде визначити TVL за формулою (2) для середньої товщини із зазначеного діапазону – 1,5 м. Для середньої товщини стін бункерів 1,5 м TVL становитиме 273,69 мм. Отримана величина TVL узгоджується з величиною TVL для випромінювання витоку в бетоні за методикою (IAEA, 2006), у якій це значення дорівнює 279 мм.

На думку авторів, значення TVL у методиці (NCRP Report 151, 2006) визначені саме для малих кутів (менше 30°) між напрямком випромінювання витоку і віссю первинного випромінювання, хоча в методиці (NCRP Report 151, 2006) зазначено, що TVL випромінювання витоку визначено саме для кута 90° від осі первинного випромінювання. Відповідно до статті (Han et al., 2023), у якій описано проведення дослідження кутового розподілу спектра випромінювання навколо мішені лінійного прискорювача, зі зменшенням кута напрямку випромінювання від осі первинного випромінювання частина спектра з високими енергіями збільшується. Згаданий вище ефект багатократного розсіювання випромінювання в голівці лінійного прискорювача для малих кутів напрямку випромінювання є незначним за рахунок більшої енергії випромінювання. Таким чином, на малих кутах випромінювання витоку має більшу енергію, а отже, і більшу TVL.

Дискусія і висновки

За результатами проведеного дослідження була визначена товщина десятикратного ослаблення бетоном для випромінювання витоку медичного

лінійного прискорювача, яка становить 273,69 мм. Отримана величина узгоджується з наведеним у методиці МАГАТЕ (ІАЕА, 2006) значенням 279 мм. Таким чином, результати цього дослідження підтверджують коректність величини $TVL = 279$ мм, яка може бути використана під час розрахунку біологічного захисту медичних закладів із лінійними прискорювачами електронів та застосування принципу оптимізації радіаційного захисту. Використання значення TVL з методики (NCRP Report 151, 2006) можна вважати доцільним для оцінювання "зверху" товщини захисту від випромінювання витоку з точки зору консервативного підходу розрахунків біологічного захисту для медичних лінійних прискорювачів.

Внесок авторів: Дмитро Белих – концептуалізація, дослідження, методологія; Тетяна Литвинська – керування дослідженням, написання – оригінальна чернетка; Віталій Полудненко – візуалізація, обробка даних; Ольга Ситнікова – формальний аналіз, написання – перегляд і редактування.

Список використаних джерел

Han, D., Jung, K., Kim, J., Kwon, D., Lee, K., & Lee, C. (2023). Evaluation by thickness of a linear accelerator target at 6-20 MeV electron beam in MCNP6. *Nuclear Engineering and Technology*, 55(6), 1994–1998. <https://doi.org/10.1016/j.net.2023.02.026>

IAEA. (2006). *Radiation Protection in the Design of Radiotherapy Facilities*. Safety Reports Series No. 47.

ICRP. (2010). *Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures*. Publication 116, Ann. ICRP 40(2-5).

NCRP Report 151. (2006). Structural shielding design and evaluation for megavoltage X- and gamma-ray radiotherapy facilities. *Journal of Radiological Protection*, 26(3), 349. <https://doi.org/10.1088/0952-4746/26/3/b01>

Sato, T., Iwamoto, Y., Hashimoto, S., Ogawa, T., Furuta, T., Abe, S., Kai, T., Matsuya, Y., Matsuda, N., Hirata, Y., Sekikawa, T., Yao, L., Tsai, P.E., Hunter, H.N., Iwase, H., Sakaki, Y., Sugihara, K., Shigyo, N., Sihver, L., & Niita, K. (2024). Recent improvements of the Particle and Heavy Ion Transport code System – PHITS version 3.33. *J. Nucl. Sci. Technol.*, 61, 127–135.

References

Han, D., Jung, K., Kim, J., Kwon, D., Lee, K., & Lee, C. (2023). Evaluation by thickness of a linear accelerator target at 6-20 MeV electron beam in MCNP6. *Nuclear Engineering and Technology*, 55(6), 1994–1998. <https://doi.org/10.1016/j.net.2023.02.026>

IAEA. (2006). *Radiation Protection in the Design of Radiotherapy Facilities*. Safety Reports Series No. 47.

ICRP. (2010). *Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures*. Publication 116, Ann. ICRP 40(2-5).

NCRP Report 151. (2006). Structural shielding design and evaluation for megavoltage X- and gamma-ray radiotherapy facilities. *Journal of Radiological Protection*, 26(3), 349. <https://doi.org/10.1088/0952-4746/26/3/b01>

Sato, T., Iwamoto, Y., Hashimoto, S., Ogawa, T., Furuta, T., Abe, S., Kai, T., Matsuya, Y., Matsuda, N., Hirata, Y., Sekikawa, T., Yao, L., Tsai, P.E., Hunter, H.N., Iwase, H., Sakaki, Y., Sugihara, K., Shigyo, N., Sihver, L., & Niita, K. (2024). Recent improvements of the Particle and Heavy Ion Transport code System – PHITS version 3.33. *J. Nucl. Sci. Technol.*, 61, 127–135.

Отримано редакцію збірника / Received: 20.06.24

Прорецензовано / Revised: 02.07.24

Схвалено до друку / Accepted: 30.09.24

Dmytro BIELYKH¹, Master of Arts
ORCID ID: 0000-0002-5782-9827
e-mail: do_belykh@sstc.ua

Tetiana LYTVYNSKA¹, Master of Arts
ORCID ID: 0000-0002-3308-8526
e-mail: tv_litvinskaya@sstc.ua

Vitalii POLUDNENKO¹, Master of Arts, Researcher
ORCID ID: 0000-0002-8307-6777
e-mail: va_poludnenko@sstc.ua

Olha SITNIKOVA¹, Master of Arts, Senior Engineer
ORCID ID: 0000-0002-0602-9731
e-mail: ol_kolodiichuk@sstc.ua

¹State Enterprise "State Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety",
Kyiv, Ukraine

DETERMINATION OF THE TENTH VALUE LAYER OF LEAKAGE RADIATION ATTENUATION FROM MEDICAL LINEAR ACCELERATORS WITH THE ENERGY OF 6 MEV

Introduction. *The article addresses the significant differences observed in the tenth-value layers (TVL) of leakage radiation attenuation in concrete for medical linear accelerators (linacs) between internationally recognized methodologies of the National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP) and the International Atomic Energy Agency (IAEA).*

Methods. *These differences have implications for the biological protection calculations. The study aims to determine the TVL for leakage radiation from 6 MeV medical linacs using the Monte-Carlo method.*

Results. *The study identifies that for an average concrete wall thickness of 1.5 meters, the TVL equals approximately 273.69 mm.*

Conclusions. *This value 273.69 mm is consistent with the IAEA's value of 279 mm. The study's findings provide a more realistic TVL value for leakage radiation, which aligns closely with the IAEA's data, thus offering a reliable reference for designing radiation protection in medical facilities using linacs.*

Keywords: *tenth-value attenuation layer, linear accelerator, radiation safety, shielding, Monte Carlo method.*

Автори Д. Бєлих, Т. Литвинська, В. Полудненко та О. Сітнікова заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors D. Bielykh, T. Lytvynska, V. Poludnenko and O. Sitnikova declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

УДК 621.384.64:615.849.1

DOI: <https://doi.org/10.17721/3041-1491/2024.11-17>

Сергій БРОВЧУК^{1,2}, канд. фіз-мат. наук

ORCID ID: 0000-0002-1083-1196

e-mail: brovchuksm@gmail.com, sbrovchuk@lisod.ua

Аліна ДІДІК², магістр

e-mail: didalinn@gmail.com

Олена САФРОНОВА², канд. мед. наук

ORCID ID: 0000-0002-2671-3880

e-mail: safronovaelena@ukr.net

Зоя ШЕПІЛЬ², лікар з променевої терапії

ORCID ID: 0009-0004-5584-3918

e-mail: shepilzoya@gmail.com

¹Лікарня ізраїльської онкології LISOD, Київ, Україна

²Національний науковий центр хірургії та трансплантології
імені О.О. Шалімова, Київ, Україна

ВВЕДЕННЯ В ЕКСПЛУАТАЦІЮ МЕДИЧНИХ ЛІНІЙНИХ ПРИСКОРЮВАЧІВ ІЗ ПІДІГНАНИМИ ПАРАМЕТРАМИ (MATCHED LINACS)

Вступ. Якість лікування в променевій терапії є необхідною для досягнення позитивних результатів. Незаплановані перерви в лікуванні можуть подовжити загальний курс терапії, збільшуючи ризик рецидиву пухлин. Це проблема, що спостерігається в усіх формах променевої терапії.

Методи. Однією з основних причин перерв є тимчасова несправність обладнання, і вирішенням може бути лікування пацієнтів на будь-якому з двох лінійних прискорювачів, якщо вони правильно підігнані, без потреби перепланування. Тому це дослідження фокусується на аналізі дозиметричних характеристик двох лінійних прискорювачів, використовуючи водяний фантом і антропоморфний фантом з 1386 детекторами для верифікації планів лікування.

Результати. Порівнювались відсоткові глибинні дози, профілі доз і їх симетрія. Верифікація планів окремо на обидвох прискорювачах показала, що 95 % точок дозиметричних мап збігаються в межах 3 % / 2 мм. Виходячи з аналізу, середня розбіжність у дозиметричних характеристиках становить менше 0,5 %, що свідчить про високу точність підгонки параметрів лінійних прискорювачів. Середній рівень збіжності лікувальних планів 98,3 %.

Висновки. Результати підтверджують високу надійність і точність планування лікування на обох прискорювачах, що забезпечує оптимальне лікування пацієнтів.

Ключові слова: лінійний прискорювач, глибинна відсоткова доза, параметри профілю, пацієнт-специфічна гарантія якості.

Вступ

Забезпечення якості лікування у променевій терапії критично важливе для досягнення позитивних клінічних результатів. Незаплановані перерви під час курсу терапії можуть призвести до подовження загальної тривалості лікування, що сприяє активній репопуляції пухлинних клітин. Для багатьох

© Бровчук Сергій, Дідик Аліна, Сафронова Олена, Шепіль Зоя, 2024

швидкозростаючих видів раку існує значний обсяг клінічних досліджень, що демонструють, як некомпенсовані перерви, які збільшують загальний час лікування, підвищують ризик локального рецидиву пухлин (Pozo et al., 2019, р. 239–244). Це явище спостерігається при всіх видах променевої терапії: радикальної і паліативної та поширюється на дистанційну променеву терапію і брахітерапію. Для деяких типів пухлин, таких як плоскоклітинний рак ротоглотки, стравоходу, легень, шийки матки подовження часу лікування може призвести до втрати контролю над пухлиною в межах від 0,8 % до 1,6 % на кожен додатковий день лікування (Dale, & Jones, 2022).

Найпоширенішою причиною переривання лікування є пошкодження обладнання та/або його технічне обслуговування. Одним із найочевидніших рішень цієї проблеми є можливість переміщення пацієнтів, які проходять опромінення, між двома лінійними прискорювачами, без потреби в переплануванні в разі несправності одного з них (Donmoon et al, 2020, р. 1505). Інтеграція кількох лінійних прискорювачів в одному відділенні променевої терапії підвищує ефективність і гнучкість клінічної команди. Коли верифіковано, що прискорювачі функціонують у межах встановлених допусків параметрів, це забезпечує більшу мобільність у разі простою лінака, як запланованого, так і несподіваного, і може зменшити ризики, пов'язані з необхідністю лікувати пацієнта на конкретному прискорювачі (Goodall et al, 2022).

Методи

Для підігнаних лінійних прискорювачів, окрім вимірювань, необхідних для побудови моделі, за якою система планування буде розраховувати дозовий розподіл в об'ємі тіла пацієнта, потрібно верифікувати можливість виконання лікувальних дозиметричних планів з однаковою точністю на цих прискорювачах. У загальному випадку еквівалентні лінійні прискорювачі можуть надавати неоднакові параметри планування. Водночас протоколи для такої верифікації поки що не розроблені (Tsuneda et al., 2023), тому в цій роботі проводиться аналіз для порівняння як дозиметричних характеристик, так і дозових розподілів, розрахованих після планування в системі Monaco 6 і виміряних на двох системах Elekta Versa HD (рис. 1) у відділенні променевої терапії. Першим етапом є (рис. 2) порівняння відсоткових глибинних доз, поздовжніх та поперечних профілів, контролю виходу дози для різних розмірів полів та калібрування абсолютної дози. Ці вимірювання виконані за допомогою водяного фантома з адекватним набором іонізаційних камер (для розмірів радіаційних полів 4 см і більше) та діодних детекторів (для розмірів радіаційних полів 4 см і менше).

Наступним етапом є верифікація індивідуальних планів лікування пацієнтів. У межах цього дослідження розраховані лікувальні плани з виміряними на обох прискорювачах були верифіковані за критерією, згідно з якою 95 % точок мають збігатися в межах 3 % / 2 мм. Але також було виміряно збіжність між собою дозиметричних мап, отриманих з обох прискорювачів. Приклади порівняння дозових мап наведено на рис. 3. Для цього вимірювання використовувався антропоморфний фантом із 1386 діодними детекторами.

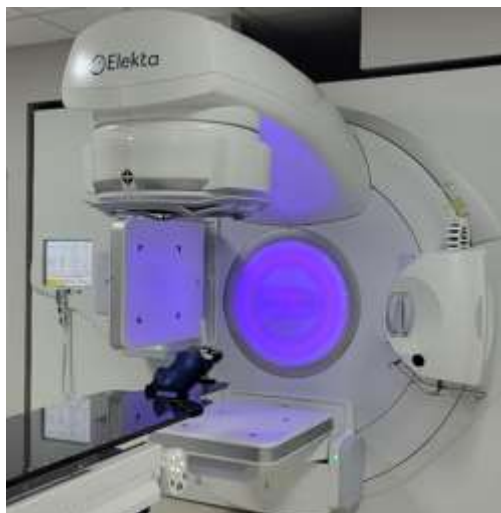


Рис. 1. Лінійний медичний прискорювач Elekta Versa HD

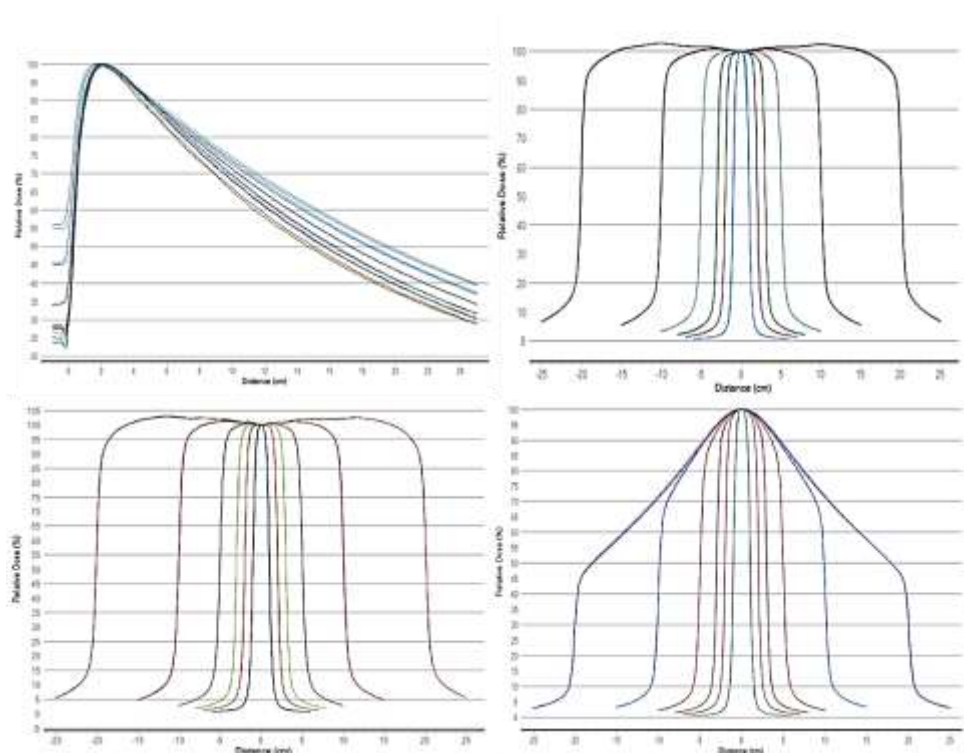


Рис. 2. Порівняння відсоткових глибинних доз та профілів для полів різного розміру

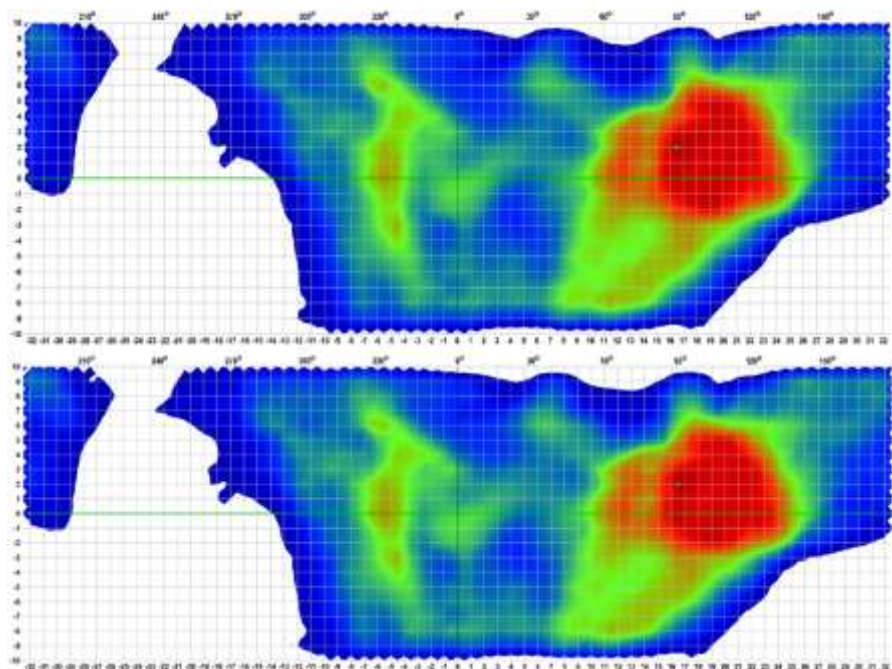


Рис. 3. Порівняння дозиметричних мап, отриманих на прискорювачах

Результати

Приклад отриманих даних перевірки дозиметричних параметрів наведено на рис. 4. Збіжність відсоткових глибинних доз та профілів радіаційного поля проаналізовано в табл. 1 та 2. Середня розбіжність становить менше 0,5 %.

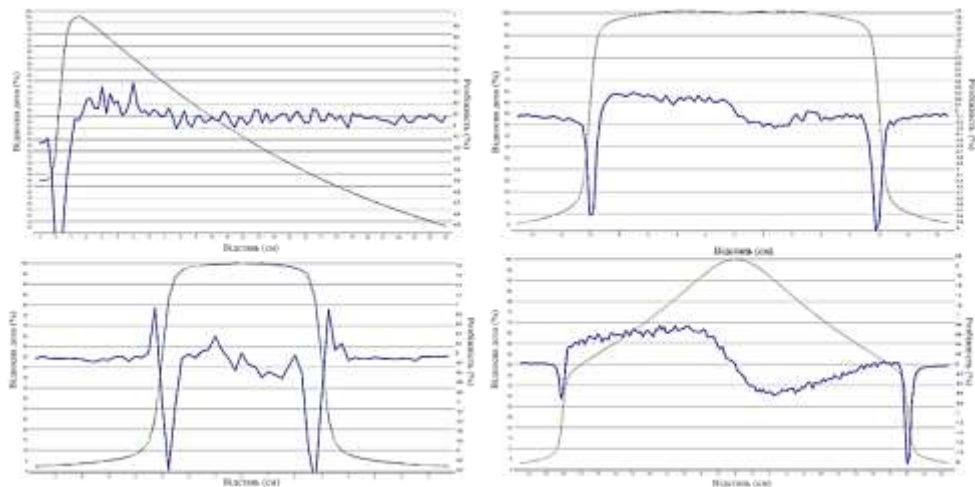


Рис. 4. Приклади порівняння відсоткових глибинних доз та профілів полів. Значення розбіжності (діаграма синім кольором) зазначено справа з ціною поділки 0,1 %

Таблиця 1

Збіжність відсоткових глибинних профілів пучка 10x10 для різних енергій

	Середня розбіжність	Розбіжність max	Розбіжність min
6 MB	0,183 %	1,12 %	0,031 %
10 MB	0,171 %	1,165 %	0,041 %
15 MB	0,287 %	2,284 %	0,058 %
6 MB (FFF)	0,133 %	0,836 %	0,015 %

Таблиця 2

Значення симетрії для поздовжніх та поперечних профілів 40x40
для різних енергій та їхні розбіжності

		Прискорювач 1	Прискорювач 2	Розбіжність
6 MB	Симетрія поздовжніх профілів	100,72 %	100,31 %	0,41 %
	Симетрія поперечних профілів	100,61 %	100,40 %	0,20 %
10 MB	Симетрія поздовжніх профілів	100,46 %	100,58 %	0,09 %
	Симетрія поперечних профілів	100,52 %	100,79 %	0,27 %
15 MB	Симетрія поздовжніх профілів	101,13 %	100,69 %	0,43 %
	Симетрія поперечних профілів	100,21 %	100,39 %	0,18 %
6 MB (FFF)	Симетрія поздовжніх профілів	100,99 %	101,07%	0,07 %
	Симетрія поперечних профілів	100,87 %	101,11 %	0,23 %

Для аналізу дозиметричних мап індивідуальних планів лікування пацієнтів були побудовані гістограми розподілу відсоткових розбіжностей (приклад наведено на рис. 5). Середній показник збіжності реалізації планів лікування на лінійних прискорювачах становить 98,3 % кількості показів детекторів у 3 % дозовому діапазоні.

Дискусія і висновки

Обладнання відділень променевої терапії декількома однотипними лінійними прискорювачами з однаково підігнаними параметрами дозволяє мінімізувати ризик незапланованих перерв у лікуванні пацієнтів, що дуже важливо для покращення ефективності лікування та віддалених його результатів, а як наслідок, – виживаності пацієнтів. Проведені вимірювання та детальний аналіз підтверджують клінічну прийнятність лікування пацієнтів на будь-якому з розглянутих прискорювачів без необхідності перепланування. Узагальнені рекомендації для проведеної верифікації потрібні і можуть бути наступним кроком продовження подібних досліджень.

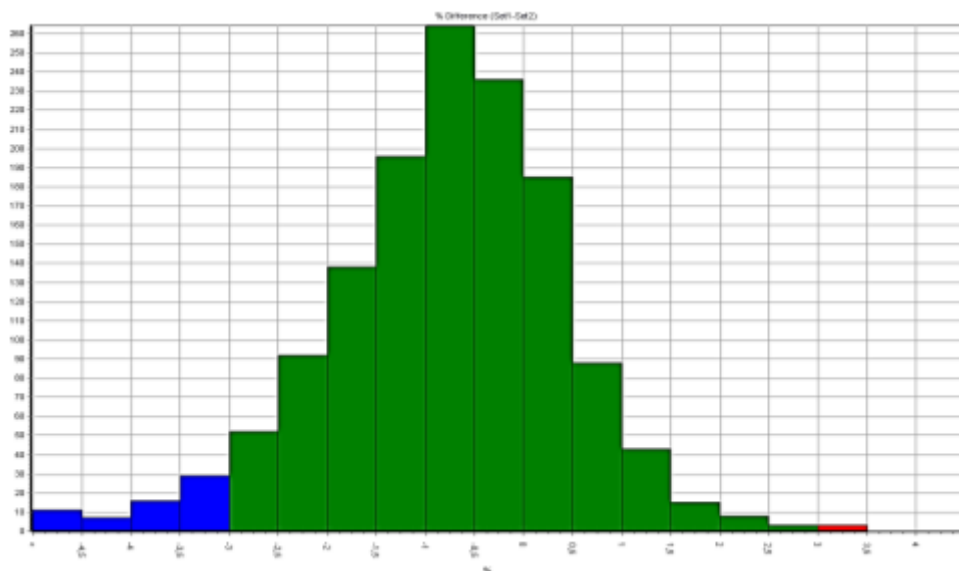


Рис. 5. Гістограма розбіжностей між двома дозиметричними мапами лікувальних планів

Внесок авторів: Сергій Бровчук – концептуалізація, методологія, вимірювання, аналіз, написання – оригінальна чернетка, перегляд і редагування; Аліна Дідик – вимірювання, аналіз, написання – оригінальна чернетка, редагування; Олена Сафронова – концептуалізація, написання – чернетка вступу, перегляд і редагування; Зоя Шепіль – концептуалізація, написання – чернетка вступу, перегляд і редагування.

Список використаних джерел

- Dale, R.G., & Jones, B. (2022). Radiotherapy treatment interruptions during the Covid-19 pandemic: The UK experience and implications for radiobiology training. *Radiation Physics and Chemistry*. 200, 110214. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110214>
- Donmoon, T., Wattanachaiyasit, S., Kaewboonperm, U., Meennuch, E., & Klaitong, C. (2020). Beam matching of two linear accelerators, identical model and brand. *J. Phys. Conf. Ser.*, 1505, 012019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1505/1/012019>
- Goodall, S.K., Dunn, L., Dunning, J., Muñoz, L., Rowshanfarzad, P., & Ebert, M.A. (2022). Matched linac stereotactic radiotherapy: An assessment of delivery similarity and distributive patient-specific quality assurance feasibility. *J. Appl. Clin. Med. Phys.*, 23(11), e13652. <https://doi.org/10.1002/acm2.13652>
- Pozo, G., Pérez-Escutia, M.A., Ruíz, A., Ferrando, A., Milanés, A., Cabello, E., Díaz, R., Prado, A., & Pérez-Regadera, J.F. (2019). Management of interruptions in radiotherapy treatments: Adaptive implementation in high workload sites. *Rep. Pract. Oncol. Radiother.* Mar-Apr, 24(2), 239–244. <https://doi.org/10.1016/j.rpor.2019.02.003>
- Tsuneda, M., Abe, K., Fujita, Y., Morimoto R., Hashimoto T., Abe Y., & Uno T. (2023). Delivery accuracy of VMAT on two beam-matched linacs provided by accelerated go live service. *J. Appl. Clin. Med. Phys.*, 24(7), e14071. <https://doi.org/10.1002/acm2.14071>

References

- Dale, R.G., & Jones, B. (2022). Radiotherapy treatment interruptions during the Covid-19 pandemic: The UK experience and implications for radiobiology training. *Radiation Physics and Chemistry*. 200, 110214. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110214>

Donmoon, T., Wattanachaiyasit, S., Kaewboonperm, U., Meennuch, E., & Klaitong, C. (2020). Beam matching of two linear accelerators, identical model and brand. *J. Phys. Conf. Ser.*, 1505, 012019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1505/1/012019>

Goodall, S.K., Dunn, L., Dunning, J., Muñoz, L., Rowshanfarzad, P., & Ebert, M.A. (2022). Matched linac stereotactic radiotherapy: An assessment of delivery similarity and distributive patient-specific quality assurance feasibility. *J. Appl. Clin. Med. Phys.*, 23(11), e13652. <https://doi.org/10.1002/acm2.13652>

Pozo, G., Pérez-Escutia, M.A., Ruíz, A., Ferrando, A., Milanés, A., Cabello, E., Díaz, R., Prado, A., & Pérez-Regadera, J.F. (2019). Management of interruptions in radiotherapy treatments: Adaptive implementation in high workload sites. *Rep. Pract. Oncol. Radiother.* Mar-Apr, 24(2), 239–244. <https://doi.org/10.1016/j.rpor.2019.02.003>

Tsuneda, M., Abe, K., Fujita, Y., Morimoto R., Hashimoto T., Abe Y., & Uno T. (2023). Delivery accuracy of VMAT on two beam-matched linacs provided by accelerated go live service. *J. Appl. Clin. Med. Phys.*, 24(7), e14071. <https://doi.org/10.1002/acm2.14071>

Отримано редакцією збірника / Received: 04.08.24

Прорецензовано / Revised: 18.08.24

Схвалено до друку / Accepted: 01.10.24

Serhii BROVCHUK^{1,2}, PhD (Phys. & Math.)

ORCID ID: 0000-0002-1083-1196

e-mail: brovchuksm@gmail.com, sbrovchuk@lisod.ua

Alina DIDIK², Master of Arts

ORCID ID відсутній

e-mail: didalinn@gmail.com

Olena SAFRONOVA², PhD (Med.)

ORCID ID: 0000-0002-2671-3880

e-mail: safronovaelena@ukr.net

Zoia SHEPIL², Radiation Oncologist

ORCID ID: 0009-0004-5584-3918

e-mail: shepilzoya@gmail.com

¹LISOD Israeli cancer care hospital, Kyiv, Ukraine

²O.O. Shalimov National Scientific Center of Surgery and Transplantology, Kyiv, Ukraine

COMMISSIONING OF MEDICAL LINEAR ACCELERATORS WITH MATCHED PARAMETERS (MATCHED LINACS)

Introduction. *The quality of treatment in radiation therapy is critically important for achieving positive outcomes. Unplanned treatment interruptions can extend the overall course of therapy and increase the risk of tumor recurrence, which is a problem observed across all forms of radiation therapy.*

Methods. *One of the main causes of interruptions is equipment being out of service temporarily. One possible solution is to transfer patients between two linear accelerators without the need for replanning in the event of equipment failure. Integrating multiple accelerators within a department enhances the efficiency and flexibility of treatment. This study focuses on analyzing the dosimetric characteristics of two linear accelerators using a water phantom and an anthropomorphic phantom with 1386 diode detectors for treatment plan verification.*

Results. *The percentage depth doses, dose profiles and dose outputs were compared. Verification of dosimetric maps of the plans were performed using the criteria that 95 % of*

the dosimetric map points agreed within 3 % / 2 mm (dose/distance). It was shown that the average discrepancy in dosimetric parameters is less than 0.5 %, indicating high precision. The average plan agreement level between two linacs is 98,3 %.

Conclusions. *The results confirm the high reliability and accuracy of treatment planning on both accelerators, ensuring optimal patient treatment.*

Key words: *linear accelerator, depth percentage dose, profile parameters, patient-specific quality assurance.*

Автори А. Дідик, О. Сафронова та З. Шепіль заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Член редакційної колегії та організаційного комітету Сергій Бровчук заявляє про відсутність конфлікту інтересів та невтручання в процес оцінювання цієї статті відповідно до міжнародних стандартів публікаційної етики. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors A. Didik, O. Safronova and Z. Shepil declare no conflicts of interest. The member of the Editorial board and a member of the Organizing committee S. Brovchuk declares no conflict of interest and has not interfered in the evaluation process of this article, in accordance with international publication ethics standards. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

ПЕРЕВАГИ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДИКИ ОПРОМІНЕННЯ НА ГЛИБОКІЙ ЗАТРИМЦІ ДИХАННЯ (DIBH) ПІД ЧАС СТЕРЕОТАКТИЧНОЇ РАДІОТЕРАПІЇ (SBRT)

Вступ. Сучасна променева терапія широко використовує новітні технічні засоби для покращення якості і точності опромінення злоякісних новоутворень. За останні роки стереотактична радіотерапія пухлин легень та черевної порожнини починає застосовуватись більш активно. Причиною цього є впровадження нових пристроїв для синхронізації опромінення з диханням пацієнта. Мета роботи розглянути та оцінити застосування нових технічних засобів у променевій терапії у лікуванні пацієнтів методикою SBRT.

Методи. Для топометричної підготовки використовувався комп'ютерний томограф. Як додаткові діагностичні матеріали використовувались зображення МРТ. Планування радіологічних планів лікування виконувалося за допомогою плануючої системи Monaco (Elekta Solutions AB).

Результати. Кожен пацієнт проходив КТ-топометричну підготовку, під час якої виконувалося сканування та визначення глибини затримки вдиху. Після підготовки пацієнта проводиться КТ-сканування, далі – процедура оконтурювання органів ризику та мішені. Під час лікування пухлин легень зміщення CTV (клінічного обсягу лікування), викликане диханням, можна знівелювати кількома способами. Зазвичай використовують рішення, засноване на отриманні 4D-КТ. Методи IGRT передбачають активний контроль дихання (ABC) разом з контролем дихання за методикою DIBH.

Висновки. Нові технічні засоби для контролю за положенням та диханням пацієнтів дозволяють зменшити об'єм опромінення та відмовитися від використання додаткових структур для опромінення (ITV), що надає можливість зменшити дозове навантаження на критичні органи, та дозволяє використовувати методику лікування SBRT з більшою безпекою для пацієнта.

Ключові слова: променева терапія, глибока затримка дихання (DIBH), стереотактична радіотерапія (SBRT).

Вступ

Стереотактична радіотерапія (SBRT) – це метод променевої терапії, що використовує високоточні поля для доставки дози радіації під час лікування пухлин у різних частинах тіла, окрім головного мозку. (Videtic, & Stephans 2010, р. 1). Вона також відома як стереотактична аблятивна променева терапія (SABR). Ця методика є високоефективним методом лікування пухлин легень, особливо на ранніх стадіях недрібноклітинного раку легень (NSCLC). Зазвичай таке лікування проводиться в одну або кілька фракцій (від 1 до 5 сеансів), що підвищує ефективність лікування. SBRT не потребує хірургічного втручання, що знижує ризик інфекцій і скорочує час відновлення пацієнта. Зі свого боку застосування методики глибокої затримки дихання (DIBH) у поєднанні з SBRT

© Мамчур Віталій, 2024

дозволяє зменшити рухливість пухлини та навколишніх органів, покращуючи точність доставки радіації. Використання DIBN дозволяє уникнути опромінення здорових тканин, таких як серце і легені, які можуть зміщуватися під час нормального дихання.

Методи

Лікування проводилось в Медичному центрі "Клініка Мануфактура" ТОВ "Асклепійон". Для топометричної підготовки використовувався комп'ютерний томограф. Як додаткові діагностичні матеріали використовувались зображення МРТ. Планування радіологічних планів лікування виконувалося за допомогою плануючої системи Monaco (Elekta Solutions AB). Безпосередньо опромінення проводилось на медичному лінійному прискорювачі Elekta Infinity (Elekta Solutions AB) з використанням фотонного випромінювання з енергією 6 MeV без вирівнювального фільтра (FFF) та методикою доставки дози VMAT. Для контролю за диханням та зміщенням положення пацієнта використовувалась система оптичного спостереження за поверхнею тіла Catalyst+ та Sentinel (C-RAD Positioning AB). Для інформування пацієнта про глибину вдиху використовувались смарт-окуляри та різнокольорові світлові індикатори в середині процедурного кабінету.

Для оцінювання застосування технічних засобів у процесі лікування з глибокою затримкою дихання були вибрані 4 пацієнти: двоє з діагнозом аденокарцинома лівої легені (приписана доза опромінення 50 Гр за 5 сеансів), один із діагнозом гепатоцелюлярна карцинома печінки, метастаз у легені (приписана доза опромінення 60 Гр за 3 сеансів), один із діагнозом карцинома підшлункової залози (приписана доза опромінення 24 Гр за 3 сеансів).

Результати

У процесі підготовки до лікування кожен пацієнт проходив КТ-топометричну підготовку, під час якої виконувалося сканування та визначення глибини затримки вдиху. Для візуалізації дихання кожен пацієнт міг використовувати смарт-окуляри, де за допомогою передачі зображення від оптичної системи спостереження міг бачити амплітуду свого дихання (рис. 1 та 2).

Після інструктажу та підготовки пацієнта проводиться КТ-сканування, далі – процедура оконтурювання органів ризику та мішені. Після визначення положення та дози для опромінення пухлини медичні фізики здійснюють планування. Під час процесу визначається найбільш оптимальний метод доставки дози та виконується оптимізація дозового навантаження на органи ризику.

У процесі лікування пухлин легенів зміщення CTV (клінічного обсягу лікування), викликане диханням, можна знівелювати кількома способами. Найчастіше використовують рішення, засноване на отриманні 4D-КТ. Пацієнти повинні бути скановані протягом кількох циклів дихання, використовуючи зовнішній маркер, для визначення положення пухлини і легенів протягом різних фаз дихального циклу. Потім можна редагувати фази дихання для створення внутрішнього цільового об'єму (ITV) рис. 3. Крім того, слід враховувати рух органів під час лікування за допомогою променевої терапії з контролем

зображення (IGRT). Методи IGRT передбачають активний контроль дихання (ABC) у поєднанні з контролем дихання за методикою DIBH.



Рис. 1. Смарт-окуляри для візуалізації дихання пацієнта

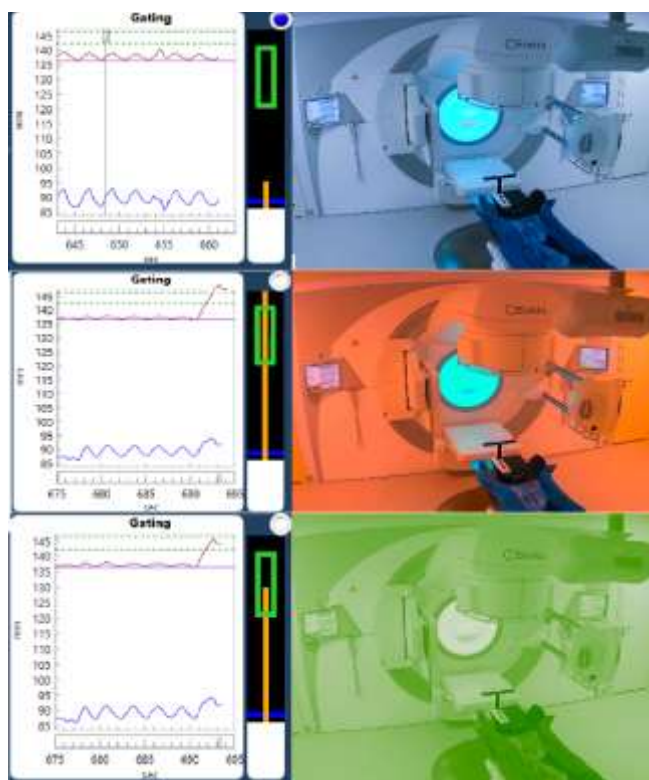


Рис. 2. Анімація амплітуди дихання (зліва), яку бачить пацієнт, і зміна освітлення у процедурному кабінеті (справа) відповідно до амплітуди дихання

Процедура опромінення проводиться з використанням оптичної системи позиціонування та контролю за диханням. Це дозволяє контролювати зміщення пацієнта з точністю до 1 мм (рис. 3). Вихід рентгенівського випромінювання синхронізовано з диханням пацієнта та розпочинається як тільки амплітуда дихання доходить до зеленого прямокутника (рис. 3).

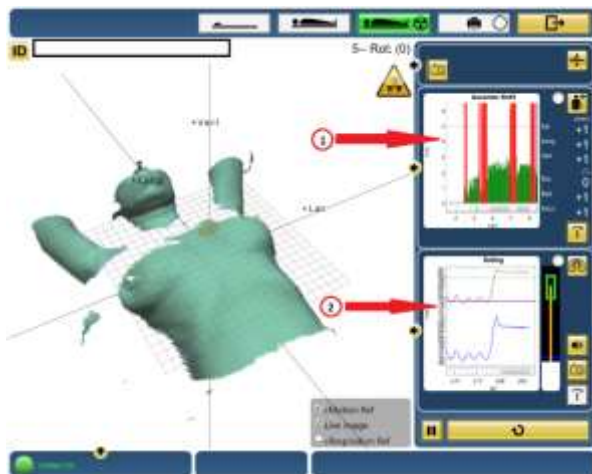
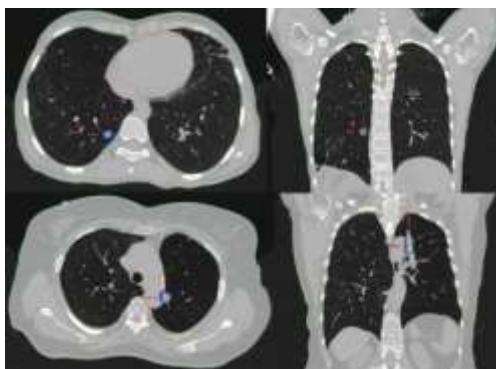


Рис. 3. Інтерфейс програмного забезпечення Catalyst+ з ділянкою контролю за положенням (1) та контролю за диханням (2) пацієнта

Розміри прямокутника визначаються методикою лікування та можливостями систем спостереження за диханням. Для методики SBRT і системи C-RAD це ± 1 мм (Nguyen et al., 2023, p. 2). Використання такої системи контролю за положенням пацієнта дозволяє відмовитись від використання ITV, що значно зменшує обсяг опромінення (рис. 4). У свою чергу, це дозволяє зменшити дозове навантаження на органи ризику, уникнути значних побічних наслідків після лікування.



**Рис. 4. Розподіл 95 % приписаної дози лікування навколо РТВ.
Планування опромінення проводиться без використання додаткового обсягу лікування – ITV**

Дискусія і висновки

Нові технічні засоби для контролю за положенням та диханням пацієнтів дозволяють зменшити обсяг опромінення та відмовитися від використання додаткових структур для опромінення (ITV), що надає можливість зменшити дозове навантаження на критичні органи та дозволяє використовувати методику лікування SBRT з більшою безпекою для пацієнта.

Подяки, джерела фінансування. Висловлюю подяку директорці ТОВ "Асклепійон" (Медичного центру "Клініка Мануфактура") Кореньковій Ользі Вячеславівні за надане обладнання та дозвіл використання матеріалів дослідження.

Список використаних джерел

Nguyen, D., Reinoso, R., Farah, J., Yossi, S., Lorchel, F., Passerat, V., Louet, E., Pouchard, I., Khodri, M., & Barbet, N. (2023, May 13). Reproducibility of surface-based deep inspiration breath-hold technique for lung stereotactic body radiotherapy on a closed-bore gantry linac. *Physics and Imaging in Radiation Oncology*, 26, 100418 <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37252251/>

Videtic, G.M., & Stephans, K.L. (2010). The Role of Stereotactic Body Radiotherapy in the Management of Non-Small Cell Lung Cancer: An Emerging Standard for the Medically Inoperable Patient? *Current oncology reports*, 12, 235–241. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11912-010-0108-1>

Reference

Nguyen, D., Reinoso, R., Farah, J., Yossi, S., Lorchel, F., Passerat, V., Louet, E., Pouchard, I., Khodri, M., & Barbet, N. (2023, May 13). Reproducibility of surface-based deep inspiration breath-hold technique for lung stereotactic body radiotherapy on a closed-bore gantry linac. *Physics and Imaging in Radiation Oncology*, 26, 100418 <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37252251/>

Videtic, G.M., & Stephans, K.L. (2010). The Role of Stereotactic Body Radiotherapy in the Management of Non-Small Cell Lung Cancer: An Emerging Standard for the Medically Inoperable Patient? *Current oncology reports*, 12, 235–241. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11912-010-0108-1>

Отримано редакцією збірника / Received: 31.07.24

Прорецензовано / Revised: 23.08.24

Схвалено до друку / Accepted: 23.10.24

Vitalii MAMCHUR, Leading Engineer-Radiologist

e-mail: mamchurvitas@gmail.com

Medical center "Manufactura Clinic" Asklepion LCC, Kyiv, Ukraine

ADVANTAGES OF USING DEEP INSPIRATION BREATH HOLD (DIBH) RADIATION METHODS DURING STEREOTACTIC RADIOTHERAPY (SBRT)

Introduction. Tumor motion is one of the main challenge of lung stereotactic body. The purpose of the presented work is to show the need to use additional methods of controlling the patient's breathing amplitude in order to refuse the use of additional volumes of treatment.

Methods. Four patients were treated by the SBRT technique using a linear accelerator under the control of the C-RAD optical positioning system. The linear accelerator carried out irradiation using the VMAT technique as soon as the amplitude of the patient's breath fell within the predetermined gap of ± 1 mm.

Results. *The use of the Deep-inspiration breath-hold (DIBH) treatment method made it possible to abandon the use of additional volumes of irradiation, which reduced the dose load on healthy tissues.*

Conclusions. *Lung SBRT in DIBH with C-RAD optical system proved reproducibility of the position with a very small gap, which made it possible to abandon additional treatment volumes (ITV) and reduce the lung dose.*

Keywords: *deep-inspiration breath-hold, Lung stereotactic body radiotherapy.*

Автор В. Мамчур заявляє про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The author V. Mamchur declares no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

УДК 616-001.28:616.12-008.313]-089.819.1

DOI: <https://doi.org/10.17721/3041-1491/2024.11-19>

Євген ПЕРЕПЕКА, д-р філософії, провід. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0001-9755-8825

e-mail: eugenepererepeka@gmail.com

Державна установа "Національний інститут серцево-судинної хірургії
імені М.М. Амосова НАМН України", Київ, Україна

Марина СИЧИК, канд. техн. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0003-0145-4744

e-mail: sychykmm@gmail.com

Державна установа "Національний інститут серцево-судинної хірургії
імені М.М. Амосова НАМН України", Київ, Україна,
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

Борис КРАВЧУК, канд. мед. наук
ORCID ID: 0000-0002-4535-7797

e-mail: boryslink@gmail.com

Державна установа "Національний інститут серцево-судинної хірургії
імені М.М. Амосова НАМН України", Київ, Україна,

ЕФЕКТИВНЕ ЗМЕНШЕННЯ РАДІАЦІЙНОГО ОПРОМІНЕННЯ ПІД ЧАС КАТЕТЕРНИХ ПРОЦЕДУР ЗА ДОПОМОГОЮ ОПТИМІЗАЦІЇ НАВІГАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРО-АНАТОМІЧНОГО КАРТУВАННЯ ТА ПРОТОКОЛУ ВИКОНАННЯ ОПЕРАЦІЇ ІЗОЛЯЦІЇ ЛЕГЕНЕВИХ ВЕН

Вступ. Ізоляція легеневих вен за допомогою радіочастотної абляції (РЧА) є найпоширенішим методом катетерного лікування фібриляції передсердь (ФП). Електрофізіологи все більше зосереджуються на методах, які дозволяють зменшити використання рентгенівського контролю під час катетерних процедур через можливі ризики іонізуючого опромінення для пацієнтів і медичного персоналу.

Методи. Застосовано оцінювання ефективності та безпеки катетерної радіочастотної абляції для ізоляції легеневих вен з мінімізацією рентгенівського опромінення за допомогою оптимізації навігаційної системи електро-анатомічного картування та протоколу операції.

Результати. Для дослідження було вибрано 43 пацієнти з ФП. Усім пацієнтам виконано катетерну РЧА ІЛВ з акцентом на зменшення рентгенівського опромінення в ДУ "НІССХ ім. М.М. Амосова НАМН України" від червня 2023 року до квітня 2024 року. У всіх 43 пацієнтів вдалося успішно електрично ізолювати всі вени. Використання методів мінімізації рентгенівського опромінення привело до значного зменшення загального добутку дози на площу (ДДП), загальної дози опромінення, часу використання рентгена та тривалості процедури порівняно з традиційними підходами.

Висновки. Використання сучасних навігаційних систем для мінімізації рентгенівського опромінення під час катетерної радіочастотної абляції ізоляції легеневих вен не призводить до підвищення ризику інтрапроцедурних ускладнень у пацієнтів з пароксизмальною та персистуючою фібриляцією передсердь. Цей підхід дозволяє значно зменшити загальний добуток дози на площу (ДДП) та дозу опромінення, не збільшуючи при цьому тривалість процедури ІЛВ.

Ключові слова: навігаційна система електро-анатомічного картування, катетерна радіочастотна абляція, транссептальна пункція, фібриляція передсердь, тривалість рентгеноскопії.

© Перепека Євген, Сичик Марина, Кравчук Борис, 2024

Вступ

Фібриляція передсердь (ФП) є однією з найбільш поширених аритмій серед населення й асоціюється з підвищеним ризиком інсульту, серцевої недостатності, збільшенням показників смертності та погіршенням якості життя (Lippi, Sanchis-Gomar, & Cervellin, 2021, p. 217–221). Радіочастотна катетерна абляція (РЧА) ізоляції легеневих вен (ІЛВ) є важливим аспектом катетерного лікування фібриляції передсердь, що не піддається медикаментозній терапії (Tzeis et al., 2024, p. 43; Joglar et al., 2024, p. 156). Процедура передбачає використання рентгенівського опромінення, яке на певних етапах необхідне для навігації та візуалізації внутрішньосерцевих структур. Електрофізіологічна спільнота все більше уваги приділяє методам, що дозволяють зменшити використання рентгенівської візуалізації під час катетерних втручань (Preda et al., 2024, p. 182).

Нещодавні дослідження вказують на негативні наслідки впливу іонізуючого випромінювання, до яких належить підвищений ризик розвитку онкологічних захворювань, уражень шкіри і навіть катаракти. Стандартними методами захисту є використання захисних бар'єрів, свинцевих фартухів і комірців для щитоподібної залози (Sommer et al., 2023, p. 191). Зважаючи на ці ризики, в електрофізіологічних лабораторіях дедалі більше уваги приділяють принципам ALARA (As Low As Reasonably Achievable – "Якомога менше та доцільно") (Gutierrez-Barríos et al., 2022, p. 1–12). Інновації в системах навігації, які не потребують іонізуючого випромінювання, демонструють перспективи у скороченні часу використання флюороскопії. Такі технології, як електроанатомічне картування, дозволяють 3D-візуалізацію кардіальних структур без використання рентгенівських променів, що не тільки підвищує точність процедури, але й значно зменшує час впливу іонізуючого випромінювання (Ali et al., 2021, p. 97–102). Важливим є також впровадження внутрішньо-серцевої ехокардіографії, яка відіграє ключову роль у зменшенні використання флюороскопії на виконання транссептальної пункції (Hang et al., 2021, p. 556–574). Постійний розвиток технологій і методів в електрофізіологічних лабораторіях свідчить про зміну підходів до безпечнішого та ефективнішого лікування аритмій. Для електрофізіологічної спільноти надзвичайно важливо продовжувати впровадження цих інновацій та вдосконалювати інтрапроцедурні протоколи, щоб підвищити безпеку як для пацієнтів, так і для медичного персоналу.

Мета науково-практичної, клінічної роботи полягає в оцінюванні ефективності та безпеки катетерної радіочастотної абляції для ізоляції легеневих вен (ІЛВ) з мінімізацією рентгенівського опромінення за допомогою оптимізації навігаційної системи електро-анатомічного картування та процедурного протоколу операції.

Методи

Вибірка досліджуваних пацієнтів. У дослідженні взяли участь 43 пацієнти з різними формами фібриляції передсердь. Усім пацієнтам виконано катетерну

радіочастотну абляцію ізоляції легеневих вен у ДУ "НІССХ ім. М. М. Амосова НАМН України" із червня 2023 року по квітень 2024 року. При цьому застосовувалися заходи для мінімізації рентгенівського опромінення. Ці заходи включали використання оптимізованого протоколу рентгенівського опромінення, що передбачав зменшення кількості кадрів за секунду та використання колімаційних рамок. Також, наскільки це було доцільно та безпечно для пацієнтів, застосовувалася лише електроанатомічна навігація після проведення трансептальної пункції.

Процедура абляції. Усі втручання для пацієнтів з досліджуваної вибірки проводив один і той самий оператор-хірург. Після виконання трансептальної пункції під рентгеноконтрастним контролем (рис. 1а) для всіх пацієнтів була створена 3D-анатомічна модель лівого передсердя та легеневих вен. Було також побудовано вольтажну карту лівого передсердя та легеневих вен для оцінювання ступеня фібротичного ремоделювання (рис. 1б). Процедура ізоляції легеневих вен (ІЛВ) проводилася згідно з протоколом "висока потужність – коротка тривалість" для радіочастотних аплікацій. Потужність і тривалість аплікацій на передній стінці лівого передсердя становили 70 Вт і 7 с, відповідно, а на задній стінці тривалість була 5 с при такій же потужності (рис. 1а). Ізоляцію легеневих вен підтверджували за допомогою зникнення характерних потенціалів у легеневих вен (блокада входу), а також блокування електричних імпульсів, що виходять з легеневої вени при стимуляції з високою амплітудою (15–20 мА/1 мс) або за наявності ізольованих потенціалів у легеневих венах без виходу в ліве передсердя (рис. 1в).

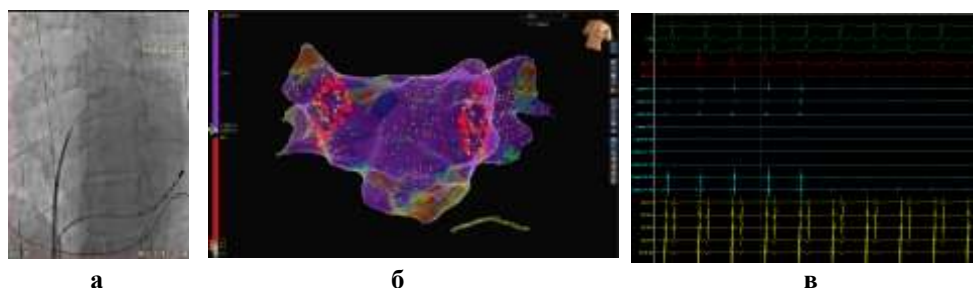


Рис. 1. Момент трансептальної пункції під рентгеноконтрастним контролем (а); 3D анатомічна і вольтажна карта лівого передсердя та легеневих вен (картування до етапу абляції).

Великі кульки – точки радіочастотних аплікацій при виконанні ІЛВ (б); критерії електричної ізоляції легеневої вени: момент зникнення потенціалів у легеневих венах – настання "блокади входу" імпульсу в ЛВ (в)

Після успішної електричної ізоляції легеневих вен починався контрольний період, що тривав 20 хв. Протягом цього часу перевіряли наявність повторного електричного з'єднання між лівим передсердям і легеневидами венами. Якщо виявлялося повторне з'єднання, проводили повторну ізоляцію тієї вени, де

воно було зафіксоване. Після успішної ізоляції всіх легеневих вен у пацієнтів з типовим тріпотінням передсердь проводили радіочастотну абляцію кавотрикуспідального перешийка, яка могла виконуватися з або без анатомічної реконструкції 3D-анатомії правого передсердя.

Групи дослідження. Після виконання транссептальної пункції та введення катетерів у ліве передсердя, у всіх випадках досліджуваної вибірки була спроба максимально зменшити використання рентгенівської візуалізації, орієнтуючись переважно на електро-анатомічну навігацію та дотримуючись принципів ALARA (As Low As Reasonably Achievable – "Якомога менше та доцільно"). Флюороскопію використовували лише для періодичного контролю положення електрода щодо інтродюсера, розташування інтродюсера в лівому передсерді та у випадках, коли катетер не вдавалося розмістити у бажаній позиції за допомогою навігаційної системи. Також за необхідності проводили контроль контурів серця для виявлення ознак гемоперикарда. На основі перших процедур, під час яких робили спроби мінімізації рентгенівського опромінення, були проспективно виділені три групи пацієнтів (за умови достатньої їх кількості), які були піддані статистичному аналізу та порівнянню (табл. 1):

- група А, або "Zero-fluoro" [$n = 16$ (37 %)], включала пацієнтів, у яких вдалося мінімізувати використання рентгенівського опромінення та досягти дуже низького рентген-часу на етапі картування та ізоляції легеневих вен, що становив менше 0,5 хв;

- група Б, або "Near Zero-fluoro" [$n = 21$ (43 %)], складалася із пацієнтів, у яких рентген-час у лівому передсерді коливався від 0,5 до 5 хв;

- група В, або "Non Zero-fluoro" [$n = 6$ (14 %)], включала пацієнтів, у яких з різних причин не вдалося значно зменшити використання рентгенівської візуалізації, переважно через анатомічні особливості або постійне зміщення 3D-карти лівого передсердя та легеневих вен, що вимагало постійного рентген-контролю під час маніпуляцій з катетерами.

Статистичний аналіз. Безперервні змінні представлялися як середнє значення $\pm$ стандартне відхилення, а категорійні змінні – у відсотках. Для статистичної обробки даних застосовували як параметричні, так і непараметричні методи варіаційної статистики. Нормальний розподіл перевіряли за допомогою тесту Шапіро–Уїлка. У разі нормального розподілу для порівняння варіаційних рядів використовували t -тест Стюдента або U -тест Манна–Уїтні, а для порівняння більше ніж двох груп застосовували тест Краскела–Уолліса. Для даних, що не відповідали нормальному розподілу, використовували відповідні непараметричні тести. Корекцію для множинних порівнянь проводили за допомогою тесту Бонферроні. Для порівняння категорійних змінних використовували точний критерій Фішера або тест χ^2 Пірсона.

Результати

У всіх 43 пацієнтів вдалося електрично ізолювати всі легеневі вени. Рентген-час для транссептальної пункції не відрізнявся між групами А ("Zero-fluoro") і Б ("Near Zero-fluoro") ($3,56 \pm 2,37$ хв vs. $3,69 \pm 2,3$ хв, $p = 0,532$), але

рентген-час для ізоляції легеневих вен у групі А ("Zero-fluoro") був значно меншим порівняно з групою Б ("Near Zero-fluoro") ($0,27 \pm 0,13$ хв vs. $1,96 \pm 1,21$ хв, $p < 0,001$). Загальний час перебування в лівому передсерді між цими двома групами статистично не відрізнявся ($81,33 \pm 22,32$ хв vs. $98,6 \pm 29,83$ хв, $p = 0,106$) (табл. 1).

Таблиця 1

Інтрапроцедурні виміри часу виконання РЧА ІЛВ, часу використання та дози рентгеноопромінення

Параметр	група А "Zero-fluoro" (n = 16)	група Б "Near Zero-fluoro" (n = 21)	група В "Non Zero-fluoro" (n = 6)	p-value
Рентген-час загальний, хв	$4,47 \pm 2,72$	$7,31 \pm 5,41$	$35,36 \pm 21$	$< 0,001$
Рентген-час на транссептальну пункцію, хв	$3,56 \pm 2,37$	$3,69 \pm 2,3$	–	0,532
Рентген-час на ізоляцію легеневих вен, хв	$0,27 \pm 0,13$	$1,96 \pm 1,21$	–	$< 0,001$
Додатковий рентген-час (абляція кавотрикуспідального перешийка тощо), n пацієнтів, хв	5 (31 %), $1,6 \pm 1,63$	8 (38 %) $4,34 \pm 5,04$	–	0,171
Загальний добуток дози на площу, Гр·см ²	$7,29 \pm 5,16$	$15,8 \pm 18,23$	$107,67 \pm 97,59$	$< 0,001$
Загальна доза опромінення, мГр	$76,62 \pm 70,82$	$132,53 \pm 127,49$	$882,32 \pm 868,62$	0,001
Тривалість процедури, хв	$112,81 \pm 30,16$	$138,06 \pm 33,44$	$167 \pm 43,53$	0,014
Час у лівому передсерді, хв	$81,33 \pm 22,32$	$98,6 \pm 29,83$	–	0,106
Інтраопераційне повторне з'єднання легеневих вен	6 (37,5 %)	11 (52,3 %)	4 (66 %)	0,429
РЧА КТП	5 (31,2 %)	7 (33,3 %)	3 (50 %)	0,696

У групі В ("Non Zero-fluoro") рентген-час для транссептальної пункції, час на ІЛВ та час перебування в лівому передсерді не фіксувалися окремо, – враховували лише загальне опромінення та час проведення процедури, оскільки технічно не вдалося досягти значного зменшення рентгенівського навантаження.

У групі А ("Zero-fluoro") ДДП та загальна доза опромінення були найменшими ($7,29 \pm 5,16$ Гр·см² і $76,62 \pm 70,82$ мГр, відповідно) і суттєво відрізнялися від показників у групі В ("Non Zero-fluoro") ($107,67 \pm 97,59$ Гр·см² та $882,32 \pm 868,62$ мГр, $p < 0,001$ та $p = 0,001$, відповідно). Тривалість процедури в групах А ("Zero-fluoro") і Б ("Near Zero-fluoro") ($112,81 \pm 30,16$ хв та $138,06 \pm 33,44$ хв) була меншою, ніж у групі В ("Non Zero-fluoro") ($167 \pm 43,53$ хв), причому в групі А ("Zero-fluoro") вона була достовірно меншою, ніж у групі В ("Non Zero-fluoro") ($p = 0,014$) (табл. 1).

Загальний добуток дози на площу (ДПІ, *англ.* DAP, Dose Area Product) та загальна доза опромінення (рис. 2) були значно меншими, коли застосовувався підхід мінімізації іонізуючого опромінення.

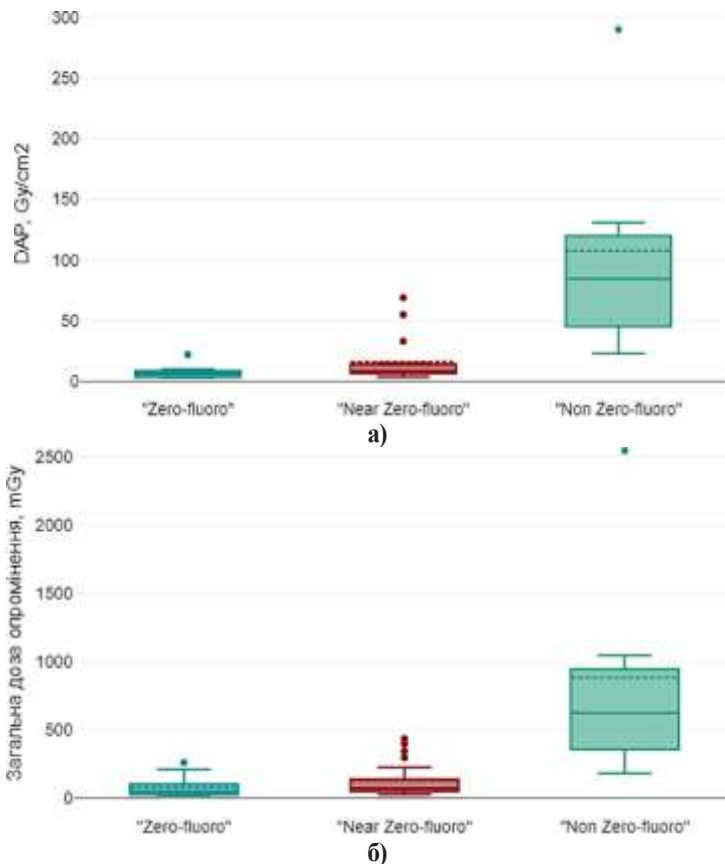


Рис. 2. Загальний ДПІ (а) і загальна доза опромінення за процедуру (б) у трьох досліджуваних групах

У жодному з випадків у досліджуваній вибірці не спостерігалось інтраопераційних ускладнень. У міру накопичення даних був розроблений і впроваджений вдосконалений протокол використання рентгеноскопії під час виконання РЧА ЛВ. Цей протокол передбачав:

- зменшення частоти кадрів з 5 до 3 fps та застосування колімаційних рамок, окрім основного орієнтування на 3D-анатомічну навігацію, демонструє позитивні клінічні результати в зменшенні часу та дози рентгенівського опромінення;
- основне рентгенівське навантаження зосереджене на проведенні трансептальної пункції. Використання внутрішньосерцевої ехокардіографії дозволяє провести цей етап без або з мінімальним іонізуючим випромінюванням. Лівопередсердний етап, включаючи картування лівого передсердя та ЛВ, також

передбачає свідому мінімізацію рентгеноскопії, дотримуючись принципів ALARA, що забезпечує пріоритет безпеки для пацієнтів;

- у контрольній групі В ("Non Zero-fluoro") не вдається зменшити рентгенівське опромінення через анатомічні особливості пацієнтів, які вимагають рентгеноконтролю під час маніпуляцій катетерами або через постійне зміщення 3D-карти лівого передсердя та легеневих вен. Це зміщення викликане глибоким диханням пацієнта. Для пацієнтів з великим індексом маси тіла та неконтрольованим диханням доцільно розглядати можливість застосування більш глибокої садації або навіть інтубаційного наркозу, що могло б зменшити потребу в рентгеноскопії.

Дискусія і висновки

У процесі дослідження вдалося досягти задовільних результатів: повної електричної ізоляції всіх вен у всіх пацієнтів, без інтра- та післяопераційних ускладнень, а також мінімізації рентгенівського опромінення у 86 % випадках.

Зменшення використання рентгенівського опромінення за допомогою сучасних навігаційних систем під час катетерної радіочастотної абляції ізоляції легеневих вен не веде до збільшення інтраопераційних ускладнень у пацієнтів з пароксизмальною та персистуючою фібриляцією передсердь. Цей підхід дозволяє суттєво знизити загальний добуток дози на площу та дозу опромінення, не подовжуючи час проведення процедури.

Внесок авторів: Євген Перепека – концептуалізація, методологія, валідація даних, написання – оригінальна чернетка, дослідження – виконання операції, хірург; Марина Сичик – програмне забезпечення, візуалізація, формальний аналіз, написання – оригінальна чернетка, дослідження – виконання операції, асистент, медичний інженер; Борис Кравчук – керування проектом, написання – оригінальна чернетка, дослідження – виконання операції, хірург.

Подяки, джерела фінансування. Робота виконана на основі аналізу клінічної діяльності електрофізіологічного підрозділу відділення лікування аритмій з рентген-операційною Державної установи "Національний інститут серцево-судинної хірургії імені М. М. Амосова НАМН України". Вагомий внесок у це актуальне практичне дослідження щодо зменшення іонізуючого впливу на пацієнта і персонал зробив весь медичний колектив відділення – хірурги, анестезіологи, операційні сестри, медичні інженери, кардіологи, які проявляють професіоналізм, ентузіазм, наполегливість і витримку у своїй роботі.

Список використаних джерел

Ali, M., Padmanabhan, D., Kanjwal, K. et al. (2021). Effect of fluoroscopy frame rate on radiation exposure and in-hospital outcomes in three-dimensional electroanatomic mapping guided procedures. *J. Arrhythm.*, 37(1), 97–102. <https://doi.org/10.1002/joa3.12496>

Gutierrez-Barrios, A., Cañadas-Pruaño, D. et al. (2022). Radiation protection for the interventional cardiologist: Practical approach and innovations. *World J. Cardiol.*, 14(1), 1–12. <https://doi.org/10.4330/wjc.v14.i1.1>

Hang, F., Cheng, L., Liang, Z. et al. (2021). Study on the Curative Effect and Safety of Radiofrequency Catheter Ablation of Paroxysmal Atrial Fibrillation via Zero-Fluoroscopy Transseptal Puncture under the Dual Guidance of Electroanatomical Mapping and Intracardiac Echocardiography. *Cardiol. Res. Pract.*, 24, 556–574. <https://doi.org/10.1155/2021/5561574>

Joglar, J.A., Chung, M.K. et al. (2024). Peer Review Committee Members. 2023 ACC/AHA/ACCP/HRS Guideline for the Diagnosis and Management of Atrial Fibrillation: A Report

of the American College of Cardiology/American Heart Association Joint Committee on Clinical Practice Guidelines. *Circulation*, 149(1), e1-e156. <https://doi.org/10.1161/CIR.0000000000001193>

Lippi, G., Sanchis-Gomar, F., & Cervellin, G. (2021). Global epidemiology of atrial fibrillation: An increasing epidemic and public health challenge. *Int. J. Stroke*, 16(2), 217–221. <https://doi.org/10.1177/1747493019897870>

Preda, A., Bonvicini, E., Coradello, E., Testoni, A., Gigli, L., Baroni, M., Carbonaro, M., Vargiu, S., Varrenti, M., Colombo, G., Paolucci, M., Mazzone, P., & Guarracini, F. (2024). The Fluoroless Future in Electrophysiology: A State-of-the-Art Review. *Diagnostics (Basel)*, 14(2), 182. <https://doi.org/10.3390/diagnostics14020182>

Sommer, P., Sciacca, V., Anselmino, M. et al. (2023). Practical guidance to reduce radiation exposure in electrophysiology applying ultra low-dose protocols: a European Heart Rhythm Association review. *Europace*, 4, 25(7), euad191. <https://doi.org/10.1093/europace/euad191>

Tzeis, S., Gerstenfeld, E.P. et al. (2024). 2024 European Heart Rhythm Association/Heart Rhythm Society/Asia Pacific Heart Rhythm Society/Latin American Heart Rhythm Society expert consensus statement on catheter and surgical ablation of atrial fibrillation. *Europace*, 30, 26(4), euae043. <https://doi.org/10.1093/europace/euae043>

References

Ali, M., Padmanabhan, D., Kanjwal, K. et al. (2021). Effect of fluoroscopy frame rate on radiation exposure and in-hospital outcomes in three-dimensional electroanatomic mapping guided procedures. *J. Arrhythm.*, 37(1), 97–102. <https://doi.org/10.1002/joa3.12496>

Gutierrez-Barrios, A., Cañadas-Pruaño, D. et al. (2022). Radiation protection for the interventional cardiologist: Practical approach and innovations. *World J. Cardiol.*, 14(1), 1–12. <https://doi.org/10.4330/wjc.v14.i1.1>

Hang, F., Cheng, L., Liang, Z. et al. (2021). Study on the Curative Effect and Safety of Radiofrequency Catheter Ablation of Paroxysmal Atrial Fibrillation via Zero-Fluoroscopy Transseptal Puncture under the Dual Guidance of Electroanatomical Mapping and Intracardiac Echocardiography. *Cardiol. Res. Pract.*, 24, 556–574. <https://doi.org/10.1155/2021/5561574>

Joglar, J.A., Chung, M.K. et al. (2024). Peer Review Committee Members. 2023 ACC/AHA/ACCP/HRS Guideline for the Diagnosis and Management of Atrial Fibrillation: A Report of the American College of Cardiology/American Heart Association Joint Committee on Clinical Practice Guidelines. *Circulation*, 149(1), e1-e156. <https://doi.org/10.1161/CIR.0000000000001193>

Lippi, G., Sanchis-Gomar, F., & Cervellin, G. (2021). Global epidemiology of atrial fibrillation: An increasing epidemic and public health challenge. *Int. J. Stroke*, 16(2), 217–221. <https://doi.org/10.1177/1747493019897870>

Preda, A., Bonvicini, E., Coradello, E., Testoni, A., Gigli, L., Baroni, M., Carbonaro, M., Vargiu, S., Varrenti, M., Colombo, G., Paolucci, M., Mazzone, P., & Guarracini, F. (2024). The Fluoroless Future in Electrophysiology: A State-of-the-Art Review. *Diagnostics (Basel)*, 14(2), 182. <https://doi.org/10.3390/diagnostics14020182>

Sommer, P., Sciacca, V., Anselmino, M. et al. (2023). Practical guidance to reduce radiation exposure in electrophysiology applying ultra low-dose protocols: a European Heart Rhythm Association review. *Europace*, 4, 25(7), euad191. <https://doi.org/10.1093/europace/euad191>

Tzeis, S., Gerstenfeld, E.P. et al. (2024). 2024 European Heart Rhythm Association/Heart Rhythm Society/Asia Pacific Heart Rhythm Society/Latin American Heart Rhythm Society expert consensus statement on catheter and surgical ablation of atrial fibrillation. *Europace*, 30, 26(4), euae043. <https://doi.org/10.1093/europace/euae043>

Отримано редакцією збірника / Received: 03.09.24

Прорецензовано / Revised: 16.09.24

Схвалено до друку / Accepted: 23.10.24

Eugene PEREPEKA, PhD, Leading Researcher

ORCID ID: 0000-0001-9755-8825

e-mail: eugeneperepeka@gmail.com

National Amosov Institute of Cardiovascular Surgery

of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Maryna SYCHYK, PhD (Engin.), Assoc. Prof.

ORCID ID: 0000-0003-0145-4744

e-mail: sychykmm@gmail.com

National Amosov Institute of Cardiovascular Surgery

of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

National Technical University of Ukraine

"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

Borys KRAVCHUK, PhD (Med.)

ORCID ID: 0000-0002-4535-7797

e-mail: boryslink@gmail.com

National Amosov Institute of Cardiovascular Surgery

of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

EFFECTIVE REDUCTION OF RADIATION EXPOSURE DURING CATHETER PROCEDURES THROUGH OPTIMIZATION OF THE ELECTROANATOMICAL MAPPING NAVIGATION SYSTEM AND PULMONARY VEIN ISOLATION PROCEDURE PROTOCOL

Introduction. *Pulmonary vein isolation (PVI) through radiofrequency ablation (RFA) is the most common method of catheter-based treatment for atrial fibrillation (AF). Electrophysiologists are increasingly focusing on techniques that reduce the use of X-ray guidance during catheter procedures due to the potential risks of ionizing radiation to patients and medical staff.*

Methods. *The aim of this scientific and clinical study is to assess the effectiveness and safety of catheter-based radiofrequency ablation for pulmonary vein isolation (PVI) while minimizing X-ray exposure through optimization of the electroanatomical mapping navigation system and procedural protocol.*

Results. *The study included 43 patients with different forms of atrial fibrillation. All patients underwent catheter-based radiofrequency ablation for pulmonary vein isolation (PVI) with a focus on reducing X-ray exposure at the M.M. Amosov National Institute of Cardiovascular Surgery from June 2023 to April 2024. To achieve this, an optimized X-ray exposure protocol was used during phases requiring X-ray guidance, and predominantly electroanatomical navigation was employed after transseptal puncture. In all 43 patients, electrical isolation of all veins was successfully achieved. The use of methods to minimize X-ray exposure resulted in a significant reduction in the total dose area product (DAP), total radiation dose, X-ray usage time, and procedure duration compared to traditional approaches. The DAP and total radiation dose in Group A ("Zero-fluoro") were the lowest ($7.29 \pm 5.16 \text{ Gy}\cdot\text{cm}^2$ and $76.62 \pm 70.82 \text{ mGy}$) and significantly differed from those in Group B ("Non Zero-fluoro") ($107.67 \pm 97.59 \text{ Gy}\cdot\text{cm}^2$ ($p < 0.001$) and $882.32 \pm 868.62 \text{ mGy}$ ($p = 0.001$)). Procedure duration was shorter in Groups A ("Zero-fluoro") and B ("Near Zero-fluoro") (112.81 ± 30.16 minutes and 138.06 ± 33.44 minutes) compared to Group B ("Non Zero-fluoro") (167 ± 43.53 minutes), with Group A ("Zero-fluoro") having a significantly shorter duration compared to Group B ("Non Zero-fluoro") ($p = 0.014$). No intraoperative complications were recorded in the sample.*

Conclusions. *The use of advanced navigation systems to minimize X-ray exposure during catheter-based radiofrequency ablation for pulmonary vein isolation does not increase the risk of intraprocedural complications in patients with paroxysmal or persistent atrial fibrillation. This approach allows for a significant reduction in the total dose area product (DAP) and radiation dose without increasing the duration of the PVI procedure.*

Keywords: *electroanatomical mapping navigation system, catheter radiofrequency ablation, transseptal puncture, atrial fibrillation, fluoroscopy duration.*

Автори Є. Перепека, М. Сичик та Борис Кравчук заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors E. Perepeka, M. Sychyk and B. Kravchuk declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

UDC 616-08-031.81

DOI: <https://doi.org/10.17721/3041-1491/2024.11-20>

Oksana KOZAK¹, PhD (Biol.)
e-mail: oko.bydenko@gmail.com

Hanna FEDORENKO¹, Radiation Oncologist
e-mail: hanna.fedorenko.98@gmail.com

Serhiy ROMANENKO¹, Radiation Oncologist
e-mail: md.romanenko@gmail.com

Lyidmila ROMANENKO¹, Radiation Oncologist
e-mail: lyidmila.romanenko@gmail.com

Oksana RODAK¹, Med. Assist.
e-mail: rodakoksana9@gmail.com

¹Region Oncology Hospital, Kyiv, Ukraine

USE OF NEEDLES IN IRRADIATION OF GYNECOLOGICAL TUMORS

Introduction. *Methods of irradiation of cervical cancer and other localizations in gynecology are constantly being improved. This is especially true for brachytherapy.*

Methods. *New applicators are being created, new types of normalization are being introduced, irradiation zones are identified, to which it is recommended to apply different doses of irradiation, recommendations for irradiation of critical organs are changing, and priorities are being set in the irradiation process.*

Results. *If more modern applicators are unavailable, additional introduction of needles freehand solves the problem of better irradiation of the pathological area.*

Conclusions. *It is important to note that in some cases, such as vaginal scar recurrence, vulvar cancer, primary and secondary vaginal lesions, and rectal cancer with vaginal invasion, external beam radiotherapy is not effective. In such cases, intratissue brachytherapy using needles plays a key role in providing local control and improving treatment outcomes. Thus, the use of needles in brachytherapy is critical to achieving therapeutic goals and improving patients' quality of life.*

Key words: *brachytherapy, intratissue irradiation, gynecological cancer.*

Introduction

From the very first day of the history of brachytherapy in irradiation of gynecological tumors, there has been a problem of high-quality irradiation of the tumor without damaging the bladder, urethra, rectum and sigmoid colon. In advanced stages, Fletcher applicators do not cope with the task at hand, and the parametrium and peripheral areas of the tumor suffer especially from insufficient irradiation.

Strict guidelines that place restrictions on irradiation of critical organs tie the hands of planning. This problem is usually solved by additional insertion of needles into the cervix or parametrium.

Methods

The procedure is performed manually free hand or with the help of special applicators such as Venice. This applicator is usually used at high stages of the disease, regardless

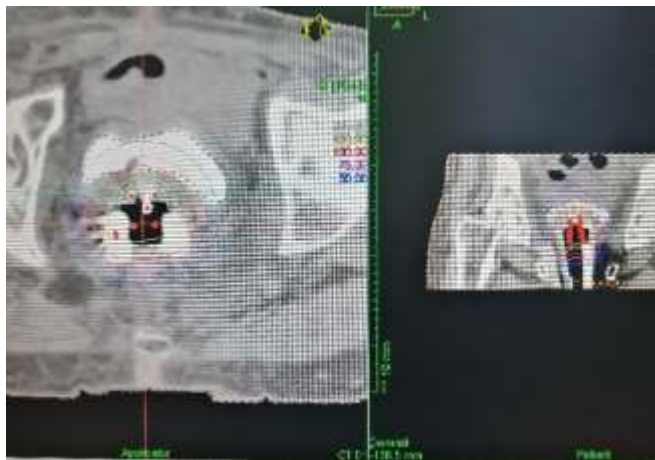
© Kozak Oksana, Fedorenko Hanna, Romanenko Serhiy, Rodak Oksana, 2024

of the size and shape of the tumor. Planning is based on MRI and is standardized not by the point, but by the volume of the lesion (Hiher-Meder et al., 2024). A high-risk zone and an average-risk zone are distinguished. In these cases, uneven distribution is effective and different doses are delivered to different areas of the lesion.

On average, the cervix is 4 cm long and needles are inserted through the guide holes in the ovoid's to the same length. We do not have such applicators in stock, we insert needles manually. Each needle changes the distribution and plays its own special role in the distribution of the dose. Usually the length to which the needle is inserted is 2–4 cm, depending on the anatomical features of the patient. Needles usually make it possible to cover the entire process with a standard is dose, adhering to the recommendations.

If, when introducing the Fletcher applicator, normalization is carried out on a fixed point, then the introduction of needles makes it possible to normalize on the tumor volume based on MRI after external radiation therapy. As far as other localizations is concerned, with rare exceptions, it is impossible to cope with recurrences using external radiotherapy. This applies to recurrences along the vaginal scar, vulvar cancer, primary and secondary lesions of the vagina, rectal cancer with invasion into the vagina (Schmid et al., 2020).

Some tumor locations cannot be stabilized at all without the use of brachytherapy, in which uneven distribution plays a key role. It is always necessary to use high isodoses in distribution. When used correctly, this helps in achieving the goal. Let us give some examples from our experience (Figs. 1–3).



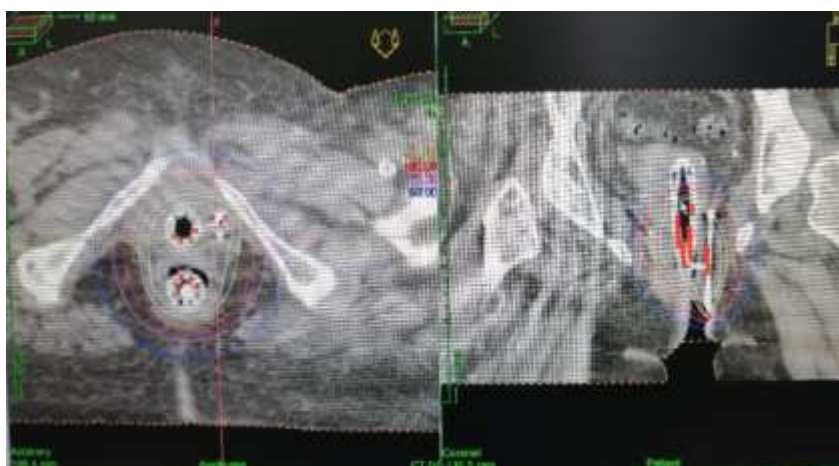
**Fig. 1. Patient F. Lesion of 1/3 of the vagina, initial tumor growth into the bladder and rectum.
After distant radiation therapy 46 Gy**

When introducing needles, only the area of residual tumor is taken into account in the dose distribution, either after external beam radiation therapy or independently in case of relapses. We actively use needles not only for gynecological tumors, but

also for squamous cell carcinoma of the lip, non-melanoma skin lesions, and for irradiation of pathological lymph nodes.



**Fig. 2. Patient D. Vulvar carcinoma.
After external beam radiation therapy 46 Gy (left)**



**Fig. 3. Patient H. Recurrence of rectal cancer (left) after surgery
and external beam radiation therapy.
Invasion into the lower wall of the vagina**

Results

The use of needles in interstitial brachytherapy, both independently and in conjunction with standard applicators, represents a critically important method for optimizing dose distribution in the treatment of gynecological tumors. This approach enables more precise targeting of radiation to the residual tumor zone, which is particularly crucial following external beam radiation therapy or in cases of recurrence.

The future of brachytherapy bases in intra-tissue techniques. More and more localizations, the tumors of which are insensitive to standard fractionation of 2-3 Gy, are successfully treated with the help of flexible applicators or needles (plastic or iron). This is especially true for relapses and metastatic lesions. In case of gynecological tumors, it is impossible to stabilize the disease without internal tissue procedures. Again, vaginal lesions, scar recurrences, primary and recurrent vulvar tumors, etc., can be eradicated only with the use of needle insertion.

Due to restrictions on critical organs in their dose distribution, Fletcher applicators cannot fully cover the lesion area, which causes relapses. It should be mentioned that, in addition to gynecological organs, brachytherapy is extremely effective for tumors of the lower ampullary region of the rectum, recurrences of the rectosigmoid region, head and neck tumors.

Dose distribution and selection of total dose and dose per fraction. This is a very difficult problem because the total dose and doses per fraction are very different when using iron needles and flexible applicators. The introduction of needles makes it possible to increase the dose per fraction.

Recalculation of EQD2 can provide guidance, but in case of relapses, in fact, both the dose distribution and dose value are based on experience, teaching and past errors. In brachytherapy, the choice of normalization points or PTV is crucial. A large role is played by the volume of irradiation, which is not included in the modern radiobiological model, but it appears in the limiting criteria of the load on critical organs. With experience, a certain and it could be said peculiar concept is created. It develops over time and keeps improving.

I would like to say a few words about the effect of dose rate on the outcome of brachytherapy treatment of non-gynecological tumors. Often in our practice we use boluses to be able to regulate the dose at a greater depth without damaging the skin. We noticed that even a small change in power affects the time of the radiation reaction and the speed of healing of the irradiated lesion.

Healing occurs significantly faster and it is possible to treat deeper tumors of both endophytic and exophytic plans, despite the fact that most exophytic tumors require the introduction of applicators. It is difficult to say what affects to a greater extent, the exposure time or the imperceptible for measurements quality of exposure.

Discussion and conclusions

Employing needles allows for comprehensive coverage of the entire process with a standard dose, thereby enhancing control over the tumor process and minimizing impact on surrounding healthy tissues. This is significantly beneficial for improving treatment effectiveness and enhancing patients' quality of life.

Further research and refinement of needle insertion techniques in brachytherapy will contribute to the development of standardized protocols, thereby enhancing the precision and effectiveness of treatment. This, in turn, will improve therapy outcomes and facilitate more successful management of tumor processes in oncological practice.

Authors' contribution: Oksana Kozak and Hanna Fedorenko – conceptualization; Oksana Kozak and Serhiy Romanenko – methodology; Hanna Fedorenko – software, formal analysis, writing-review and editing; Lyudmila Romanenko, Serhiy Romanenko and Oksana Kozak – validation; Serhiy Romanenko – investigation, supervision, funding acquisition; Lyudmyla Romanenko – resources; Oksana Rodak – data curation, project administration; Oksana Kozak – writing-original draft preparation, visualization.

Acknowledgements, sources and funding. We sincerely thank Lyudmyla Vasylivna Romanenko, Head of Radiation Therapy, and Alla Oleksandrivna Areshkovich, Chief Physician of the Kyiv Regional Oncology Dispensary, for their invaluable support and contributions to the development of brachytherapy. We acknowledge the following institutions and organizations for their contributions to this research – Kyiv Regional Oncology Dispensary.

References

Hiher-Meder, C., Potter, R., van Limbergen, E., Briot, E., De Brabandere, M., Dimopoulos, J., Dumas, I., Hellebust, T.P., Kirisits, C., Lang, S., Muschitz, S., Nevinson, J., Nulens, A., Petrow, P., & Wachter-Gerstner N. (2024). Recommendations from Gynaecological (GYN) GEC-ESTRO Working Group (I): Concepts and terms in 3D image based 3D treatment planning in cervix cancer brachytherapy with emphasis on MRI assessment of GTV and CTV. *Radiotherapy and Oncology*, 74(3), 235–245. <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2004.12.015>

Schmid, M.P., Fokdal L., Westerveld, H. et al. (2020). Recommendations from gynaecological (GYN) GEC-ESTRO working group – ACROP: Target concept for image guided adaptive brachytherapy in primary vaginal cancer. *Radiotherapy and Oncology*, 145, 36–44. <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2019.11.005>

Отримано редакцією збірника / Received: 08.07.24

Прорецензовано / Revised: 23.08.24

Схвалено до друку / Accepted: 30.09.24

Оксана КОЗАК¹, канд. біол. наук
e-mail: oko.bydenko@gmail.com

Ганна ФЕДОРЕНКО¹, лікар з променевої терапії
e-mail: hanna.fedorenko.98@gmail.com

Сергій РОМАНЕНКО¹, лікар з променевої терапії
e-mail: md.romanenko@gmail.com

Людмила РОМАНЕНКО¹, лікар з променевої терапії
e-mail: lyidmila.romanenko@gmail.com

Оксана РОДАК¹, мед. асист.
e-mail: rodakoksana9@gmail.com

¹Київський обласний онкологічний диспансер, Київ, Україна

ВИКОРИСТАННЯ ГОЛОК ДЛЯ ОПРОМІНЕННЯ ГІНЕКОЛОГІЧНИХ ПУХЛИН

Вступ. Використання голок у внутрішньотканинній брахітерапії є важливим методом для лікування гінекологічних пухлин, особливо на пізніх стадіях захворювання.

Методи. Процедура може виконуватися вручну або за допомогою спеціальних аплікаторів, таких як Venice, що дозволяє враховувати індивідуальні анатомічні особливості пацієнтів і забезпечує високу точність введення радіаційної дози. Планування лікування базується на МРТ і стандартизується за об'ємом ураження, що дозволяє ефективно розподіляти різні дози до різних ділянок пухлини.

Результати. Відсутність спеціальних аплікаторів компенсується ручним введенням голок, яке, хоча і вимагає високої кваліфікації медичного персоналу, залишається ефективним методом. Голки зазвичай вставляються на глибину 2–4 см і дозволяють охопити весь процес стандартною ізодозою, дотримуючись рекомендацій. Це забезпечує можливість нормалізації об'єму пухлини після зовнішньої променевої терапії.

Висновки. Важливо зазначити, що в деяких випадках, таких як рецидиви по рубцю вагіни, рак вульви, первинні та вторинні ураження вагіни, і рак прямої кишки з інвазією у вагіну, зовнішня променева терапія не ефективна. У таких випадках внутрішньотканинна брахітерапія з використанням голок відіграє ключову роль у забезпеченні локального контролю та покращенні результатів лікування.

Таким чином, використання голок у брахітерапії є критично важливим для досягнення терапевтичних цілей і підвищення якості життя пацієнтів.

Ключові слова: брахітерапія, внутрішньотканинне опромінення, пухлини жіночих статевих органів.

Автори О. Козак, Г. Федоренко, С. Романенко, Л. Романенко та О. Родак заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors O. Kozak, H. Fedorenko, S. Romanenko, L. Romanenko and O. Rodak declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

Володимир ВАЩИШИН, асп.
ORCID ID: 0009-0003-0005-1924
e-mail: v.vashchyshyn@oberig.ua
Клініка "Оберіг", Київ, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ SRT НА ЛІНІЙНИХ ПРИСКОРЮВАЧАХ БЕЗ 6D-СТОЛА

Вступ. За останні роки спостерігається істотне зростання кількості медичних лінійних прискорювачів в Україні. Проте переважна більшість цього обладнання не має в комплектації 6D-стола, що унеможливорює застосування корекції на поворот пацієнта і залишає можливість лише трансляційних поправок. З іншого боку, з кожним роком у протоколах лікування все більше з'являється показів до використання SRS (stereotactic radiosurgery), SBRT (stereotactic body radiation therapy) та SRT (stereotactic radiation therapy), проведення яких вимагає використання 6D-стола, тобто необхідність трансляційних і ротаційних поправок положення пацієнта.

Методи. У процесі дослідження було застосовано методи визначення амплітуди похибок, спричинених поворотами під час укладання пацієнта, та їх корекції, щоб в окремих випадках застосовувати SRT без 6D-стола.

Результати. У дослідженні розглянуто лише лікування патологій головного мозку. Для оцінювання ротаційних похибок було проаналізовано дані зміщень 66 пацієнтів, що лікували патології головного мозку. Отже, результати не можуть бути застосовані щодо інших частин тіла.

Висновки. Результати дослідження можуть розширити можливості використання наявних в Україні лінійних прискорювачів, покращуючи якість надання медичних послуг онкологічним пацієнтам (також є можливість лікувати деякі неонкологічні патології, наприклад, аденоми гіпофіза).

Ключові слова: SRT (stereotactic radiation therapy), DVH (dose volume histogram), ротаційні похибки, PTV (planning target volume).

Вступ

SRT є невід'ємною частиною сучасної променевої терапії головного мозку. Такий метод використовує високі разові дози за невелику кількість фракцій (1–5 фракцій), що дає кращі клінічні результати та приводить до суттєвого скорочення тривалості лікування. Порівняно з конвенційною терапією SRT потребує значно більшої точності підведення дози (Klein et al., 2005, р. 13–14). Це можна забезпечити більш точними алгоритмами обчислення дози, використанням додаткових систем іммобілізації пацієнта та контролем положення пацієнта за допомогою СВСТ (cone beam computed tomography).

Для реалізації контролю положення пацієнта потрібні спеціальні інструменти для корекції (Lips et al., 2009, р. 6–7). Корекції положення пацієнта поділяють на трансляційні та ротаційні. Трансляційні поправки реалізуються на всіх лікувальних столах лінійних прискорювачів, а ротаційні поправки можливі лише на столах з такою функцією.

В Україні переважна більшість прискорювачів не мають 6D-стола, тобто не можуть застосовувати поправки на ротаційні зміщення пацієнта. Таким чином, для більшості лікувальних центрів питання щодо можливості використання SRT головного мозку без наявності 6D-стола наразі дуже актуальне, оскільки 6D-стіл сприяв би збільшенню спектра інструментів у лікуванні пацієнтів.

Методи

Для дослідження можливості проведення SRT на прискорювачах без 6D-стола потрібно знати амплітуди похибок укладання пацієнта. Похибки поділяють на трансляційні та ротаційні. Трансляційні похибки – це лінійні переміщення вздовж осей x (ліво-право, ML), y (вверх-вниз, AP), z (вперед-назад, CC). Ротаційні похибки – це повороти навколо ізоцентра $pitch(\phi)$, $roll(\psi)$, $rotation(\theta)$ (зазвичай називають yaw, rtn, або CW/CCW).

Трансляційні похибки завжди можна скорегувати з використанням MV-MV, kV-kV або СВСТ на звичайному столі. Існують кілька варіантів вирішення проблеми ротаційної похибки: використання додаткових систем іммобілізації пацієнта, переукладення пацієнта або використання 6D-стола для автоматичної корекції повороту. Але неможливо зробити поправку на ротаційні похибки без переукладення пацієнта або наявності 6D-стола. Тому потрібно кількісно оцінити амплітуди ротаційних похибок для їх корекції.

Для оцінювання ротаційних похибок було проаналізовано дані зміщень 66 пацієнтів, що лікували патології головного мозку (усі пацієнти використовували термопластичні маски і стандартні підголівники). Загальна кількість проаналізованих фракцій становила 1386. Для аналізу були долучені результати kV-kV та СВСТ знімків. Середні амплітуди поворотів для кожного кута визначали як

$$\overline{\varphi_k} = \frac{1}{n_k} \sum_i^{n_k} |\Delta\varphi_i|; \quad \overline{\psi_k} = \frac{1}{n_k} \sum_i^{n_k} |\Delta\psi_i|; \quad \overline{\theta_k} = \frac{1}{n_k} \sum_i^{n_k} |\Delta\theta_i|,$$

де n_k – кількість фракцій k -го пацієнта. Розподіл середніх амплітуд ротаційних зміщень представлено на рис. 1. Усі повороти мають приблизно однакові середні похибки та їхні розподіли серед пацієнтів. Середні та медіанні значення приблизно дорівнюють одне одному для всіх осей обертання і становлять $0,7\text{--}0,8^\circ$; 95 % пацієнтів мають абсолютні середні значення відхилень менше $1,8\text{--}2,0^\circ$ (рис. 1). Окремо слід зазначити, що ці значення можуть дещо відрізнятися залежно від набору іммобілізуючих пристроїв та досвіду персоналу, який проводить укладання. Але за рахунок того, що більшість іммобілізуючих пристроїв різних виробників не мають суттєвих відмінностей, то ці результати можна застосовувати й на інші набори укладання з термопластичними масками (Fu et al., 2007, p. 1).

Для практичного застосування потрібно зробити 2 наближення:

1) можемо вважати, що поворот навколо однієї осі приводить до зміщення лише в одній площині;

2) максимальні зміщення для 95 % пацієнтів менші або дорівнюють 2° , тому для корекції за відсутності 6D-стола можна використовувати поправку на 2° .

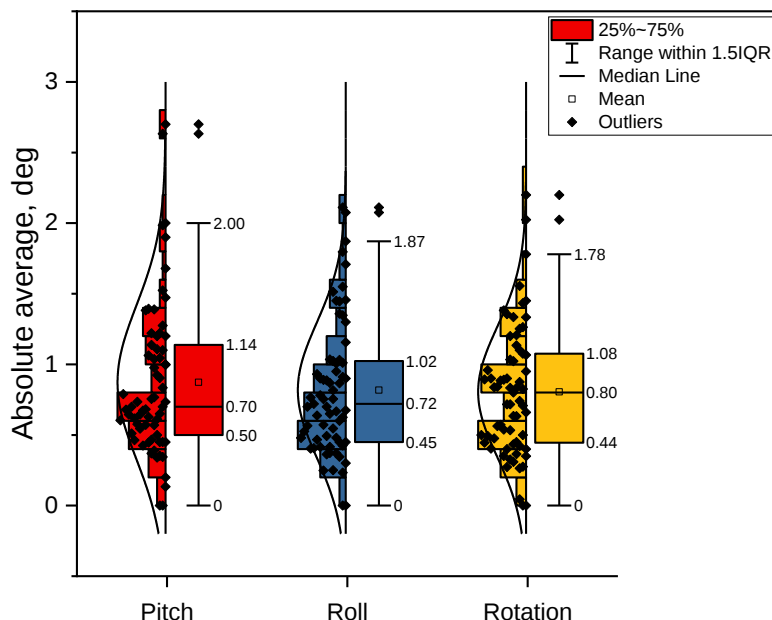


Рис. 1. Графік "whisker and box" розподілу ротаційних похибок

Зміщення точки під час повороту на 2° буде залежати лише від відстані до точки обертання, у нашому випадку до ізоцентра пучків:

$$x \approx r * \sin \alpha = r * \sin 2^\circ \approx 0,035 * r,$$

де x – додаткове розширення PTV, r – відстань від ізоцентра до найвіддаленішої точки PTV.

Таким чином, ізотропним розширенням PTV на значення x можна компенсувати максимальні зміщення через ротаційну похибку.

Результати

Для практичної реалізації описаного вище підходу ще необхідно врахувати ряд факторів, які можуть вплинути на результуючий дозовий розподіл. Вплив цих факторів можна оцінити при використанні повороту на реальних лікувальних планах з різними геометриями. Розглянемо кілька показових використань такого емпіричного підходу на прикладі пацієнтів з різною геометриєю таргетів.

Випадок 1: аденома гіпофіза, 2,6/4,8 cc об'єм CTV (clinical tumor volume) / PTV, регулярна несферична геометрія, 4 некомпланарні арки. Під час повороту на 2° не змінюється покриття PTV та CTV, тому такий план можна лікувати без використання 6D-стола (рис. 2).

Випадок 2: метастаз головного мозку, 0,7/1,9 cc об'єм CTV/PTV, сферична геометрія, 4 некомпланарні арки. Під час повороту на 2° не змінюється покриття PTV та CTV, тому такий план можна лікувати без використання 6D-стола (рис. 3).

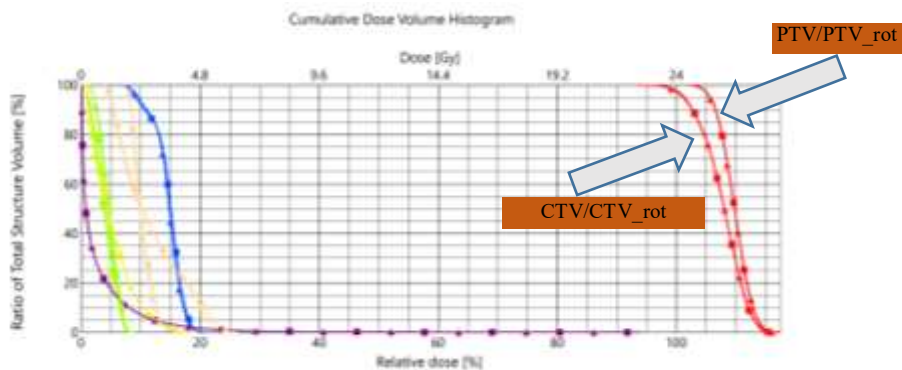


Рис. 2. DVH оригінального плану і зміщеного на 2° .
Спостерігається відсутність зміни покриття PTV та CTV під час повороту на 2°

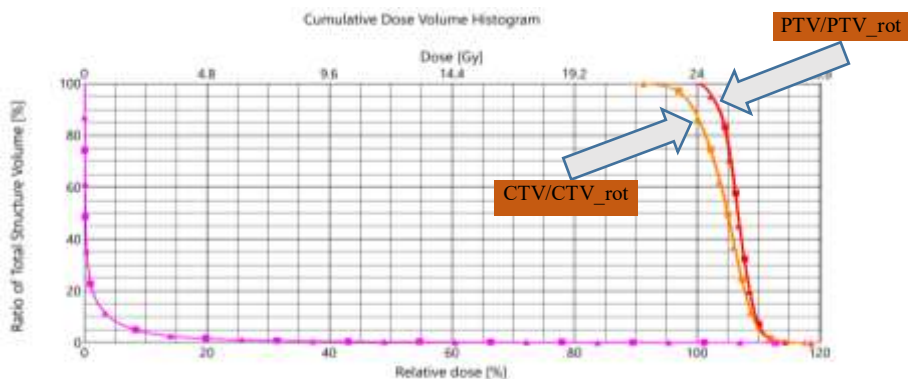


Рис. 3. DVH оригінального плану і зміщеного на 2° .
Спостерігається відсутність зміни покриття PTV та CTV під час повороту на 2°

Випадок 3: менінгіоматоз, 9,8/19,3 cc об'єм CTV/PTV (загальна кількість GTV – 12), неправильна форма, велика кількість окремих таргетів, 5 компланарних арок.

Розглянемо PTV1, яке є найвіддаленіше від ізоцентра. Якщо врахувати поправку на поворот 2° , то розширення PTV1 буде $\Delta x \approx 0,035 \cdot r = 0,32$ см. Це суттєво змінить об'єм опромінення з 1,7 cc об'єму PTV1 до 5,8 cc, що становить приріст у 241 %. Але, на відміну від попередніх випадків, лікувати такий план за відсутності 6D-стола без корекції на ротацію вже не можна, оскільки під час повороту на 2° значно погіршується покриття PTV (рис. 4), що робить такий план клінічно невиправданим. Тому потрібно розширити PTV на 0,32 см та переоптимізувати пучки опромінення.

Емпірична компенсація повороту через розширення PTV1 забезпечила достатній рівень покриття дозою (рис. 5), але ціною значного підвищення навантаження на головний мозок: 20 Gy отримувало 12,2 cc, а з розширенням – 20 Gy вже отримувало б 18,4 cc головного мозку (структура brain-GTV).

Далі розглянемо, як вплине ротація на PTV2, що розташована на відстані 3,8 см від ізоцентра.

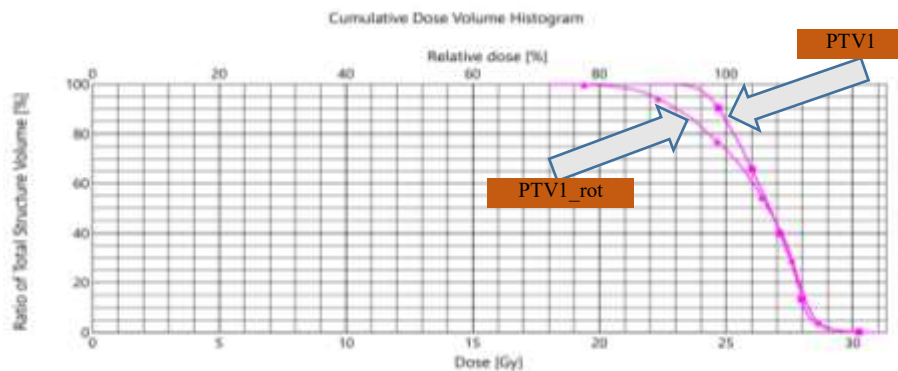


Рис. 4. DVH оригінального плану PTV1 і зміщеного на 2°.
Спостерігається значна зміна покриття PTV1 під час повороту на 2°

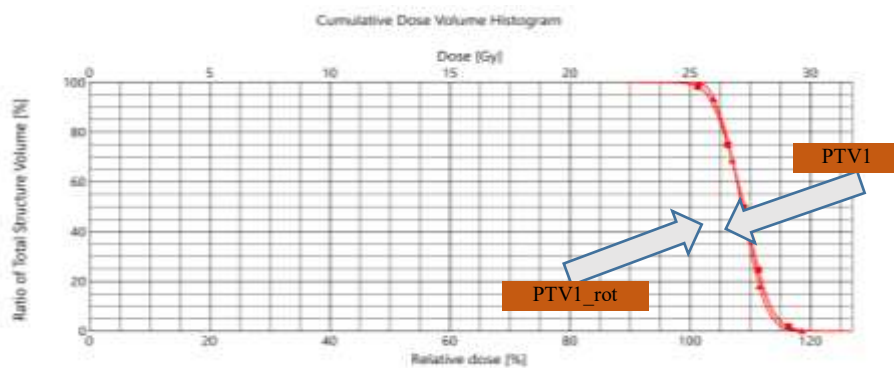


Рис. 5. DVH PTV1 оригінального і зміщеного на 2° планів
з урахуванням додаткового розширення PTV1

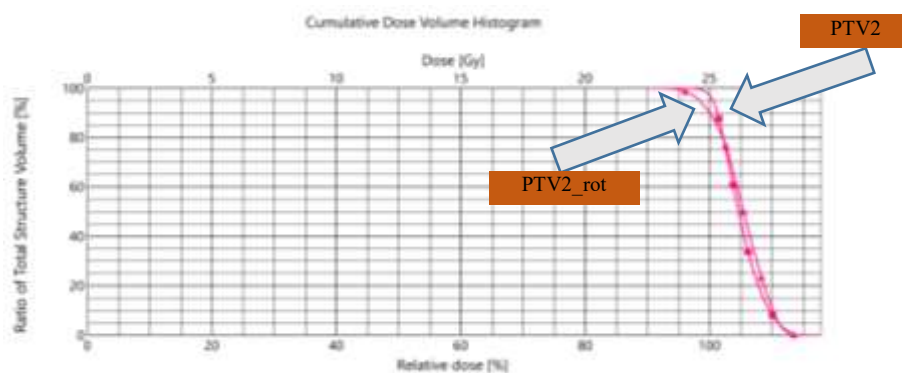


Рис. 6. DVH оригінального плану на PTV2 і зміщеного на 2°.
Спостерігається значна зміна покриття PTV2 під час повороту на 2°

Помітна значна зміна в покритті PTV2 під час повороту на 2° (рис. 6), тому необхідно зробити поправку на ротацію. З урахуванням повороту на 2° , розширення PTV2 буде $\Delta x \approx 0,035 \cdot r = 0,13$ см, що змінить об'єм PTV2 із 5,1 cc об'єму до 8,1 cc, тобто відсотковий приріст становитиме 53 %. Додаткове розширення PTV2 дало змогу ефективно відновити покриття (рис. 7) за відсутності 6D-стола за рахунок збільшення об'єму опромінення та збільшенням навантаження на головний мозок з 12,2 cc отримувало 20 Gy до 13,8 cc – 20 Gy.

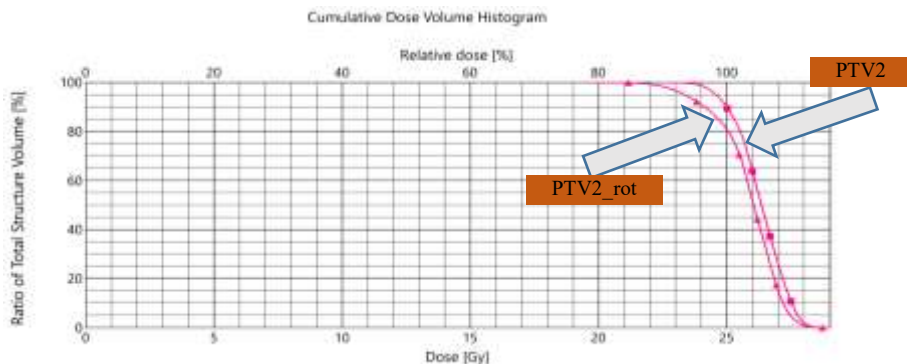


Рис. 7. DVH PTV2 оригінального і зміщеного на 2° планів з урахуванням додаткового розширення PTV2

Отже, початкові припущення щодо компенсації ротаційної похибки на практиці виявилися ефективними для відновлення дозового покриття таргетів, але при цьому збільшуючи навантаження на здорові тканини. Такий метод можна застосовувати, якщо є значний дозовий запас у дозовій толерантності критичних органів. В окремих випадках геометрії таргетів повороти на 2° взагалі не впливали на клінічну значимість лікувального плану, що дозволило б проводити SRT без додаткової корекції за відсутності 6D-стола.

Дискусія і висновки

У результаті статистичної обробки результатів укладення пацієнтів з патологіями головного мозку було визначено, що pitch, roll та rotation мають дуже схожі максимальні середні амплітуди ротаційних зміщень – $1,8\text{--}2^\circ$. Медіани ротаційних зміщень становлять $0,7\text{--}0,8^\circ$. Тобто, якщо вважати, що відсутність 6D-стола спряжена з максимальною ротаційною похибкою в 2° кожної осі обертання, то звичайне розширення PTV дозволить скомпенсувати її, що було продемонстровано в розгляді практичних випадків.

Підсумовуючи, можемо виділити ряд індикаторів, які дозволили б проводити SRT патологій головного мозку без 6D-стола:

- великі та середні за розміром таргети;
- сферична симетрія таргета;
- розміщення ізоцентра в геометричному центрі таргета;

- наявність лише одного таргета;
- відстань від поверхні більше 1 см;
- використання VMAT.

А рядом ознак, які перешкоджають проведенню SRT без ротаційної корекції можна вважати:

- дуже маленькі за розміром таргети (<1 cc).
- нерегулярна геометрія;
- розміщення ізоцентра поза межами PTV;
- велика кількість таргетів;
- близькість або прилягання до поверхні;
- використання IMRT.

Важливо зазначити, що сферично-симетричні таргети розміром більше 1 cc, геометричний центр яких збігається з ізоцентром, взагалі можуть не потребувати додаткової корекції, а тому відсутність 6D-стола ніяк не вплине на клінічну ефективність.

Подяки, джерела фінансування. Висловлюємо подяку генеральному директору Клініки "Оберіг" Рибчуку Віктору Олександровичу за надану можливість використовувати обладнання для розрахунків лікувальних планів. Висловлюємо подяку завідувачій відділенням променевої терапії Сілаєвій Ользі Святославівні за допомогу в організації проведення дослідження.

Список використаних джерел

Fu, W., Yang, Y., Yue, N.J., Heron, D.E., & Huq, S.M. (2007). Study of rotational setup errors and their dosimetric impacts on head and neck IMRT treatments using kilovoltage cone-beam computed tomography (kV CBCT). *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.*, 69, S188.

Klein, E.E., Drzymala, R.E., Purdy, J.A., & Michalski, J. (2005). Errors in radiation oncology: a study in pathways and dosimetric impact. *J. Appl. Clin. Med. Phys.*, 6, 81–94.

Lips, I.M., van der Heide, U.A., Kotte, A.N.T.J., van Vulpen, M., & Bel, A. (2009). Effect of translational and rotational errors on complex dose distributions with off-line and on-line position verification. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.*, 74, 1600–1608.

References

Fu, W., Yang, Y., Yue, N.J., Heron, D.E., & Huq, S.M. (2007). Study of rotational setup errors and their dosimetric impacts on head and neck IMRT treatments using kilovoltage cone-beam computed tomography (kV CBCT). *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.*, 69, S188.

Klein, E.E., Drzymala, R.E., Purdy, J.A., & Michalski, J. (2005). Errors in radiation oncology: a study in pathways and dosimetric impact. *J. Appl. Clin. Med. Phys.*, 6, 81–94.

Lips, I.M., van der Heide, U.A., Kotte, A.N.T.J., van Vulpen, M., & Bel, A. (2009). Effect of translational and rotational errors on complex dose distributions with off-line and on-line position verification. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.*, 74, 1600–1608.

Отримано редакцією збірника / Received: 04.08.24

Прорецензовано / Revised: 18.08.24

Схвалено до друку / Accepted: 01.10.24

Volodymyr VASHCHYSHYN, PhD Student

ORCID ID: 0009-0003-0005-1924

e-mail: v.vashchyshyn@oberig.ua

Oberig Clinic, president of UAMP, Kyiv, Ukraine

APPLICATION OF SRT ON LINEAR ACCELERATORS WITHOUT A 6D TABLE

Introduction. *Over the past few years, the number of linear accelerators in Ukraine has grown significantly, but not a single one has appeared that has a 6D couch for correcting rotational misalignment. Because of this, many doctors are hesitant to perform high-dose SRT treatment regimens. On the other hand, the number of indications for SRT in international protocols is growing every year. Thus, modern aggressive treatment methods are difficult to apply in our realities, since there is little data on the total error caused by rotational error.*

Methods. *The methods of this study are the determination and evaluation of amplitudes of head rotational errors and their compensation mechanisms for the possibility of SRT on linear accelerators without a 6D couch. This will increase the frequency of SRT use for brain pathologies and improve the effectiveness of radiation therapy for this segment of cancer patients.*

Results. *The study only considered treatment of brain pathologies. To assess rotational errors, displacement data from 66 patients treated for brain pathologies were analyzed. Therefore, the results cannot be applied to other parts of the body.*

Conclusions. *The results of the study will allow us to increase the frequency of use of NRT for brain pathologies and improve the effectiveness of radiation therapy for this segment of cancer patients.*

Keywords: *SRT (stereotactic radiation therapy), 6D couch, linear accelerator, rotational error.*

Автор В. Ващишин заявляє про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The author V. Vashchyshyn declares no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

УДК 621.386.86

DOI: <https://doi.org/10.17721/3041-1491/2024.11-22>

Sergii MIROSHNYCHENKO, DSc (Engin.), Prof.

ORCID ID: 0009-0008-2167-5484

e-mail: msi@teleoptic-pra.com.ua

National Aviation University, Kyiv, Ukraine

Oleksandra MIROSHNYCHENKO, PhD (Engin.), Assoc. Prof.

ORCID ID: 0000-0002-3612-7615

e-mail: o.miroshnychenko@nau.edu.ua

National Aviation University, Kyiv, Ukraine

Yurii KHOBTА, Principal Programmer Engineer

Scopus ID: 57204507455

e-mail: yuriy.khobta@teleoptic-pra.com.ua

Teleoptic PRC, LTD, Kyiv, Ukraine

CALCULATION OF EFFECTIVENESS OF THE VETERINARY X-RAY SYSTEMS PROTECTIVE CABIN

Introduction. *The transition from the use of X-ray film to digital radiography (DR) has made X-ray diagnostics in veterinary clinics simple and efficient. The number of examinations is small compared to medical use, but a significant part of them is performed without anesthesia of the animals by manual fixation of the animals. Such fixation of the animals is usually performed by veterinary clinic staff.*

Methods. *In this work, we measured the dose loads and calculated the protection efficiency of a new cabin for a veterinary X-ray system. Cabins provide protection in space in three coordinates. Accordingly, the calculations of the attenuation coefficients must also be performed in volume.*

Results. *The experimentally found values of the three-dimensional distribution of the attenuation coefficients on the surface of the cabin make it possible to calculate the necessary thickness of lead protection, which guarantee compliance with the relevant sanitary standards. In the experiment, a decrease in the protection factor of the screen with a lead equivalent of 0.6 mm was registered up to 2 times, which corresponds to an increase in the effective anode voltage. Thus, the well-known in X-ray tomography effect of increasing the hardening of radiation appeared.*

Conclusions. *In veterinary medicine, compared to human medicine, the presence of personnel who fix the animal with their hands is fundamentally different. This workplace is located in close proximity to both the direct X-ray beam and the maximum scattered radiation. It requires special attention during calculating X-ray protection. The small size of the cabin, where the X-ray examination is performed, reduces the area and the price of structural protection. That determines the economic attractiveness of the concept.*

Keywords: *digital radiography, protection, veterinary medicine, cabin, computed tomography, Compton effect.*

Introduction

The transition from the use of X-ray film to digital radiography (DR) has made X-ray diagnostics in veterinary clinics simple and efficient. This led to an increase in the number of X-ray studies for small veterinary clinics from 20...30

© Miroshnychenko Sergii, Miroshnychenko Oleksandra, Khobta Yurii, 2024

to 200...300 per month. Such a number of examinations is small, compared to medical use, but a significant part of them is performed without anesthesia of animals with the help of fixing animals with hands. Such fixation of animals is usually performed by the staff of veterinary clinics. As a result, the radiation load on clinic staff also increased tenfold. In addition, cone beam X-ray tomography scanners (CBCT) are starting to be used in small veterinary clinics, which also creates X-ray dose loads. These features necessitate the development of more effective means of protection for the personnel of veterinary clinics (IAEA, 2024, p. 7).

Methods

The existing concept of protection was developed in the middle of the last century for film technology. Protection measures include individual means: aprons, gloves, collars, caps and glasses, as well as structural means: lead sheets, barite platei and protective curtains (Ministry of Health of Ukraine, 2007, p. 17). Individual means are put on people, and the X-ray room is equipped with structural means. Individual protective equipment has a considerable weight – 6...10 kg, which is inconvenient for clinic staff. Structural means do not protect personnel in the X-ray room. They cover a large area of walls and ceilings and, as a result, are expensive (Fig. 1a).

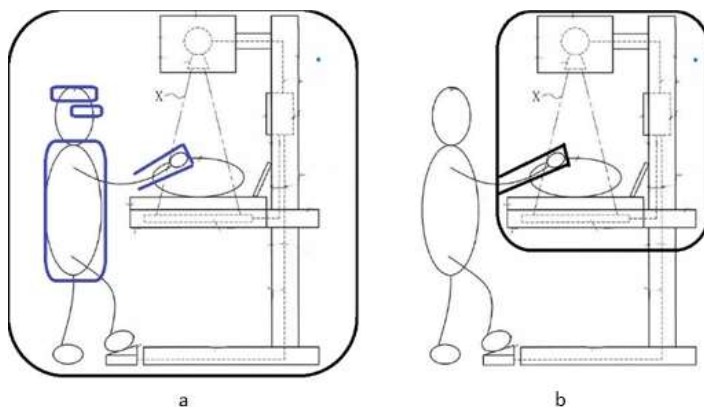


Fig. 1. Protection of the clinic staff in the X-ray room with individual protective equipment 0,25...0,5 mm Pb and structural means – outside the X-ray room 0,5...1,5 mm Pb (a).

Protection of the clinics staff in and outside the X-ray room with the help of a cabin 0,6...2,0 mm Pb (b)

Places of installation and the lead equivalent of structural protection means are calculated in advance, which turns the cabinet into a stationary system and excludes mobility. A detailed description of the X-ray room of the veterinary complex is given in the US patent N 10,045,751B2 (Okusu, Ohashi, & Okabe, 2018, p. 17), issued in the name of the Fuji film company.

The concept proposed by us (Miroshnychenko, O., Miroshnychenko, S., & Nevhasymyi, 2024, p. 14) is new for veterinary implementation, but is commonly used in population lung screening and non-destructive control systems, based on the use of

a mobile protective cabin. A fundamentally new feature is the presence of workplace of staff that fix the animal by the hands (Fig. 1b). This workplace is in close proximity to both the direct X-ray beam and the scattered radiation maximum. It requires special attention when calculating X-ray protection. In this work, we offer a combination of individual and structural means of protection. Structural protection is placed on cabins tripod, which makes it possible to significantly decrease the dose load and ensure the convenience of human work. At the same time, the small dimensions of the cabin, where the X-ray examination is performed, reduces the area and the price of structural protection. That determines the economic attractiveness of the concept.

The cabin provides protection in space in three coordinates (abbreviated – in 3D, Fig 2). Accordingly, the calculations of the attenuation coefficients have also to be performed in 3D. The values of the three-dimensional function $K(x,y,z)$ found experimentally on the surface of the cabin make it possible to calculate the required thickness of lead protection $Pb(x, y, z)$ according to the tables (Ministry of Health of Ukraine, 2007, p. 54), which guarantee compliance with the relevant sanitary standards.



Fig. 2. Exterior view of the closed (a) and open (b) DR cabin.
Exterior view of the closed CBCT cabin (c)

Results

In this concept of X-ray protection all radiation divided into two parts: direct one (zone A, Fig. 3a) – includes direct irradiation not in the way to the receiver, and scattered (by Compton effect) – includes radiation scattered by an animal (zone B, Fig. 3a). In both DR and CBCT systems, the direct radiation of the X-ray tube matches on the X-ray sensitive field of the receiver. This makes it possible to reduce intensity the direct beam with separate screens behind the receiver and on the back surface of the emitter.

The basis for the calculation of radiation protection (Ministry of Health of Ukraine, 2007, p. 42) is the determination of the attenuation factor – K of the dose rate of X-ray radiation at a given point in the absence of protection P_D to the value of the protected dose rate P_{Dp} , in units of the absorbed or exposure dose:

$$K = P_D / P_{Dp} . \quad (1)$$

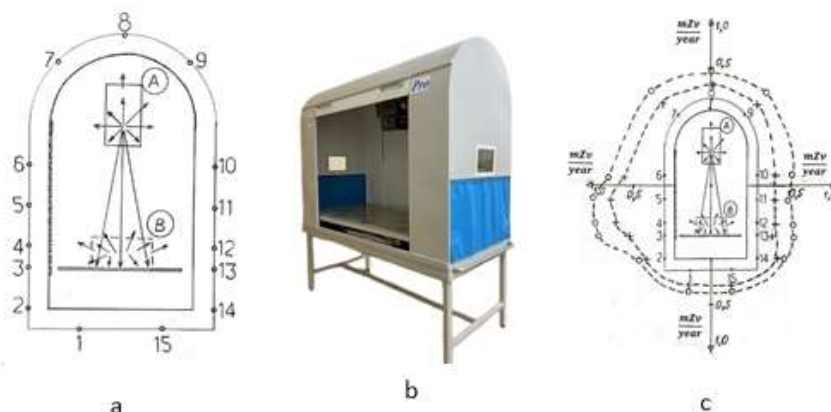


Fig. 3. Zones of direct (A) and scattered (B) radiation (a). External view of the cabin (b). Graphs of the annual dose load without (+) and with the presence (o) of a water phantom

For conducting research, a cabin with protective screens and fabric curtains was made to reduce direct radiation. In addition, the entire inner surface of the cabin was covered with a screen with the equivalent of 0.6 mm of lead. The place of the worker who fixes the animal is located on the side of the fabric curtains and transparent window (Fig. 3b). During the experiment, the radiation components were measured separately at points 1–15 (Fig. 3a) in the absence and presence of a water phantom. The research was carried out in two stages with dosimeter GS-01.

At the first stage, direct radiation was studied by measuring the power of the radiation dose P_D without the protection. Then the protection was installed: 1.0 mm of lead on the frontal and back side of emitter and 0.5...0.6 mm of lead on the side walls and the radiation dose with protection P_{Dp} were measured. The attenuation factor K of individual screen on the back side of the emitter, P_{Dey} equivalent annual dose with and P_{Dnev} without protection were calculated (Table 1).

At the second stage, the presence of the animal was simulated using an equivalent water phantom (zone B Fig. 3a). P_{DF} and P_{DpF} – the dose rate of X-ray radiation at a given point in the absence and with protection, K_F – attenuation factor, P_{DpeyF} and P_{DeyF} – equivalent annual dose with and without protection in presence of phantom respectively.

During the experiment with a water phantom, a decrease in the protection factor of the screen with a lead equivalent of 0.6 mm was registered up to 2 times; σ – relative reduction of the protection factor – $\sigma = K_F/K$. That is, the effect known in computer tomography of increasing the hardness of radiation in the presence of a biological object in the field of study appeared. Physically, this is due to the fact that during the formation of scattered radiation by a water phantom, low-energy photons are absorbed by the phantom itself, and radiation with a more "hard" energy distribution is emitted the outside of the phantom.

Table 1

Results of measurement of short-term dose rate and attenuation factor

Point No	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
P_D , mSv/h	18,3	24	50	52	51	50	50	50	51	52	53	24	18,3
P_{Dp} , mSv/h	0,79	1,3	1,8	1,9	2,0	0,91	0,71	0,73	0,78	0,80	0,83	0,43	0,46
K	23,2	18,5	27,8	27,4	25,5	54,9	70,4	68,2	65,5	62,4	63,8	55,8	39,8
P_{Dey} , mSv/y	5,3	6,7	13,9	14,5	14,3	14,3	14,1	14,3	13,8	13,4	14,7	6,7	5,6
P_{Dpey} , mSv/y	0,23	0,36	0,50	0,53	0,56	0,26	0,20	0,21	0,21	0,23	0,23	0,12	0,14
P_{DF} , mSv/h	18,2	57	55	57	53	52	52	52	53	57	55	57	18,2
P_{DpF} , mSv/h	0,9	3,2	3,5	3,5	2,6	1,7	1,49	1,49	1,61	1,59	1,62	1,78	0,48
K_F	20,2	14,3	15,6	16,3	20,4	30,6	34,9	34,9	32,9	35,8	33,9	32	37,9
P_{DeyF} , mSv/y	5,3	12,9	15,3	15,9	14,7	14,7	14,7	14,7	14,8	16,11	15,3	16,0	5,7
P_{DpeyF} , mSv/y	0,26	0,9	0,98	0,98	0,72	0,48	0,42	0,42	0,45	0,45	0,45	0,50	0,15
σ	0,87	0,77	0,56	0,6	0,8	0,56	0,5	0,5	0,5	0,57	0,53	0,57	0,95

As a result, the additional protection of the cabin surface with 0.5...0.6 mm of lead on the border satisfied the condition of the permissible annual dose of less than 5 mSv/year (the graph is marked – ooo, Fig. 3c).

Discussion and conclusions

The combination of individual and structural means of protection makes it possible to significantly increase the degree of protection and the convenience of a person's work. At the same time, the small size of the cabin, where the X-ray examination is performed, reduces the area and the price of structural protection. That determines the economic attractiveness of the concept.

Authors' contribution: Sergii Miroshnychenko – conceptualization, formal analysis, writing – original draft; Oleksandra Miroshnychenko – formal analysis, writing – review&editing; Yurii Khobta – investigation.

References

Ministry of Health of Ukraine. (2007). *On the approval of the State sanitary rules and norms "Hygienic requirements for the arrangement and operation of X-ray rooms and the conduct of X-ray procedures"* (order dated June, 04, 2007 No. 294, Rev. Dated November, 14, 2017) [in Ukrainian]. [МОЗ України. (2007). *Про затвердження Державних санітарних правил і норм "Гігієнічні вимоги до влаштування і експлуатації рентгенкабінетів і проведення рентгенологічних процедур"* (наказ від 04.06.2007 р. № 294, ред. від 14.11.2017)]. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1256-07#Text>

IAEA. (2024, March 4–6). *Technical meeting report: New Era of medical imaging*. Event code: EVT2303935. <https://www.iaea.org/events/evt2303935>

Miroshnychenko, O., Miroshnychenko, S., & Nevhasymyi, A. (2024). *Veterinary X-ray device*. UA u 2024 02966, 04.06.2024 Decision for issue № 14253/3У/24, 19.11.2024 [in Ukrainian]. [Мірошніченко, О., Мірошніченко, С., Невгасимий, А. (2024). *Ветеринарно-рентгенівський апарат* UA u 2024 02966, 04.06.2024 Заявка № 14253/3У/24, 19.11.2024].

Okusu, K., Ohashi, Y., & Okabe, Y. (2018, Aug. 14). *Console device of portable type, control method and radiographic imaging system* (Patent. US № 10,045,751B2). FUJIFILM Corporation.

Отримано редакцією збірника / Received: 01.07.24

Прорецензовано / Revised: 23.09.24

Схвалено до друку / Accepted: 23.10.24

Сергій МІРОШНИЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.

ORCID ID: 0009-0008-2167-5484

e-mail: msi@teleoptic-pra.com.ua

Національний авіаційний університет, Київ, Україна

Олександра МІРОШНИЧЕНКО, канд. техн. наук, доц.

ORCID ID: 0000-0002-3612-7615

e-mail: o.miroshnychenko@nau.edu.ua

Національний авіаційний університет, Київ, Україна

Юрій ХОБТА, гол. інж.-програміст

Scopus ID: 57204507455

e-mail: yuriy.khobta@teleoptic-pra.com.ua

ТОВ НВК Телеоптик, Київ, Україна

РОЗРАХУНОК ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАХИСНОЇ КАБІНИ ДЛЯ ВЕТЕРИНАРНОЇ РЕНТГЕНІВСЬКОЇ СИСТЕМИ

Вступ. Перехід від використання рентгенівської плівки до цифрової рентгенографії (ДР) зробив рентгенодіагностику у ветеринарних клініках простою й ефективною. Кількість обстежень порівняно з медичним використанням невелика, але значна їх частина проводиться без анестезії тварин шляхом ручної фіксації тварин. Таку фіксацію тварин зазвичай проводять працівники ветеринарної клініки.

Методи. Проведено вимірювання дозових навантажень та розраховано ефективність захисту нової кабінки для ветеринарної рентгенівської системи. Кабіни забезпечують захист у просторі за трьома координатами, відповідно й обчислення коефіцієнтів ослаблення необхідно виконувати, використовуючи просторові координати.

Результати. Знайдені експериментально значення тривимірного розподілу коефіцієнта ослаблення рентгенівського випромінювання на поверхні кабінки дають можливість по таблицях розрахувати необхідні товщини свинцевого захисту, які гарантують виконання відповідних санітарних норм. В експерименті було зареєстровано зниження коефіцієнта захисту екрана майже у два рази при вимірюваннях з водним фантомом, порівняно з вимірюваннями без нього. Це відповідає підвищенню ефективної анодної напруги. У процесі дослідження проявився відомий у рентгенівській томографії ефект збільшення жорсткості випромінювання, коли фотони з низькою енергією поглинаються фантомом, а з високою проходять крізь нього.

Висновки. Принципово новим є наявність місця персоналу, який фіксує тварину руками. Це місце розташоване у безпосередній близькості як до прямого рентгенівського променя, так і до максимуму розсіяного випромінювання. Робоче місце потребує особливої уваги в розрахунках рентгенівського захисту. До того ж, за рахунок малого розміру кабінки, де виконується рентгенівське обстеження, зменшується площа і ціна конструкційних засобів захисту. Це зумовлює економічну привабливість концепції.

Ключові слова: цифрова рентгенографія, захист, ветеринарія, медицина, кабінка, комп'ютерна томографія, ефект Комптона.

Автори О. Мірошниченко та Ю. Хобта заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Член редакційної колегії С. Мірошниченко заявляє про відсутність конфлікту інтересів та невтручання в процес оцінювання цієї статті відповідно до міжнародних стандартів публікаційної етики. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors O. Miroshnychenko and Y. Khobta declare no conflicts of interest. The member of the Editorial board S. Miroshnychenko declares no conflict of interest and has not interfered in the evaluation process of this article, in accordance with international publication ethics standards. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

БІОМЕДИЧНА ІНЖЕНЕРІЯ BIOMEDICAL ENGINEERING

УДК 534.87:534-8

DOI: <https://doi.org/10.17721/3041-1491/2024.11-23>

Evgen BARANNIK, DSc (Phys. & Math.), Prof.

ORCID ID: 0000-0002-3962-9960

e-mail: evgenij.a.barannik@karazin.ua

V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

Mykhailo HRYTSENKO, Master of Arts

ORCID ID: 0009-0002-5670-5686

e-mail: mykhailo.hrytsenko@student.karazin.ua

V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

SPECTRA OF ULTRASOUND DOPPLER RESPONSE USING PLANE-WAVECOMPOUNDING TECHNIQUE

Introduction. *Within the framework of a simple model of the sensitivity function, the Doppler spectra are considered for different ways of generating response signals using plane wave compounding.*

Methods. *A Doppler spectrum is obtained for coherent compounding of signals received at different steering angles of waves during their period of changing. Compared to traditional diagnostic systems, the Doppler spectrum width is increased only by limiting the duration of the signals. There is no additional increase in the spectrum width if the compound signals are formed by adding with cyclic permutation, in which signals from each new wave angle are compounded.*

Results. *When a Doppler signal is formed directly from Doppler signals at different steering angles, the spectral width increases both in comparison with the traditional method of sensing with stationary focused ultrasound fields and with the case of coherent signal compounding.*

Conclusions. *The obtained increase in the spectral width has an intrinsic physical meaning. The increase in width is connected with a dynamic change in the Doppler angle, which increases the interval of apparent projections of the velocities of motion of inhomogeneities along the direction of transmitting of a plane wave without inclination.*

Keywords: *ultrasound; Doppler spectrum, plane wave compounding, synthetic aperture method, spectral dispersion, projection of the inhomogeneity velocity.*

Introduction

The general idea behind synthetic aperture in ultrasound diagnostics is that the ultrasound response is recorded by all elements of the ultrasound transducer for a sequence of different emitted wave fields. The response for each point in space is then identified as a complex value for the different fields, which is coherently summed, resulting in a high-resolution image due to the focusing at each point in space (Trots et al., 2011, p. 3). Using the synthetic aperture method, it is possible to implement imaging methods that use plane waves with different propagation directions or wave

© Barannik Evgen, Hrytsenko Mykhailo, 2024

fronts with different spatial configurations (Golfetto et al., 2021, p. 1105; Montaldo et al., 2009, p. 489; Sheina, Kiselov, & Barannik, 2020, p. 5). Moreover, it is necessary to optimise the parameters that characterise the quality of images obtained using aperture synthesis (Provost et al., 2015, p. 1467). There are experimental works on new techniques within the plane wave compounding method that allow to improve image quality in terms of lateral resolution and contrast-to-noise ratio for two-dimensional images (Zheng et al., 2018, p. 495) and for Doppler technique (Shen, & Chu, 2021, p. 4856). The effect of the movement of ultrasonic scatterers and the ways to correct this impact were investigated in (Hyun, & Dahl, 2020, p. 1323).

The calculations have been implemented within the framework of the continuum model of the biological medium and the low-frequency Doppler signal under the pulsed mode of ultrasound.

Methods

Emission depends on the motion of the density inhomogeneities and compressibility. It also depends on the complex sensitivity function over the emission-receiving field which may also depend on time.

$$G_p'(\vec{r}) = G_t(\vec{r}, t)G_r(\vec{r}, t)b\left(T_1 - \frac{x'}{c_0} - \frac{x'\cos\Phi(t)}{c_0}\right). \quad (1)$$

The time dependence is caused by small deviations of the wave vector from the wave vector of plane waves without inclination (Sheina, & Barannik, 2022, p. 116).

In the case of the synthetic aperture technology, it is possible to generate an ultrasonic Doppler response signal directly from discrete signal values from different sequential angles of revolution of the wave vector. For a given range of angles Φ , the ultrasonic Doppler response signals are registered for a limited period of time, after which the registration procedure is repeated periodically. Then the power spectrum of the Doppler signal is equal to:

$$S(\omega_p) = \frac{k^4}{(2\pi)^3} \sum_{j=-\infty}^{\infty} \int d\vec{q} C(\vec{q}, \omega_p - \omega_j) |G(\vec{q} + 2\vec{k}, \omega_j)|^2, \quad (2)$$

where $\omega_p = 2\pi p/T$ is the Fourier expansion variable, and T is the period of repeating a given set of deflection angles. There is another way to generate an ultrasonic Doppler signal. Discrete values are obtained by coherent compounding of complex signal values at different angles of rotation for the entire period of angle change T . Then the spectrum can be written as follows:

$$S(\omega_p) = T^2 \frac{k^4}{(2\pi)^3} \int d\vec{q} C(\vec{q}, \omega_p) |G(\vec{q} + 2\vec{k}, 0)|^2, \quad (3)$$

$$G(\vec{q} + 2\vec{k}, 0) = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} G(\vec{q} + 2\vec{k}, t + t') dt'. \quad (4)$$

Within the framework of our model, it follows from (3) that in this case the sensitivity function is independent of frequency. To reduce the effect of the rectangular window on the calculated spectra Gaussian weighting window are used.

Results

In the case of the synthetic aperture technology, it is possible to generate an ultrasonic Doppler response signal directly from discrete signal values from different

sequential angles of revolution of the wave vector. For a given range of angles Φ , the ultrasonic Doppler response signals are registered for a limited period of time, after which the registration procedure is repeated periodically and formula for the Doppler spectrum:

$$S(\omega_p) = \nu \left\langle (\tilde{\beta} - \tilde{\rho})^2 \right\rangle T^{-1} k^4 \frac{\pi^3 a^3}{4} \sqrt{\frac{T_W^2 a^2}{a^2 + T_W^2 V^2}} \exp \left\{ -\frac{T_W^2 a^2}{a^2 + T_W^2 V^2} \frac{(\omega_p - \omega_d)^2}{4} \right\}. \quad (5)$$

Then the dispersion of the Doppler frequency spectrum equal to $\sigma^2 = 2 \left(\frac{1}{T_W^2} + \frac{V^2}{a^2} \right)$.

There is another way to generate an ultrasonic Doppler signal. Discrete values are obtained by coherent compounding of complex signal values at different angles of rotation for the entire period of angle change T . The final expression for the ultrasonic Doppler response spectrum

$$S(\omega_p) = \left\langle (\tilde{\beta} - \tilde{\rho})^2 \right\rangle k^4 T^{-2} T_W^2 \frac{\pi^2 a^4}{8} \sqrt{\frac{\pi}{2a^2 + T_W^2 V^2}} \exp \left\{ -\frac{T_W^2 a^2 (\omega_p - \omega_d)^2}{4(2a^2 + T_W^2 V^2)} \right\}. \quad (6)$$

Then the dispersion of this Doppler spectrum can be written as follows $\sigma^2 = 2 \left(\frac{2}{T_W^2} + \frac{V^2}{a^2} \right)$ and it is greater than the dispersion of the previous spectrum (5) by $\Delta\sigma^2 = 2/T_W^2$.

The reason for the increase in the width of the Doppler spectrum when forming a signal from Doppler signal counts obtained at different steering angles is the change in the projection of the motion velocity onto the direction of the current wave vector due to a change in the Doppler angle, as shown in Fig 1. This situation can be interpreted as a movement with acceleration:

$$V_{x'} = V \cos \vartheta(t) = V \cos(\vartheta \mp \Phi) = V(\cos \vartheta \cos \Phi \pm \sin \vartheta \sin \Phi) \cong V \cos \vartheta \pm V \sin \vartheta \frac{\Phi_{\max}}{T_W} t. \quad (7)$$

Acceleration is inversely proportional to the time T_W . It is clear that both during acceleration and deceleration, the range of velocities during time T for a given range of angles is the same, so the width of the spectrum cannot depend on the sign of the acceleration. Because of this, in dispersion of the spectrum (6), compared to dispersion of spectrum (5), there is a quadratic acceleration term in the form of $2/T_W^2$.

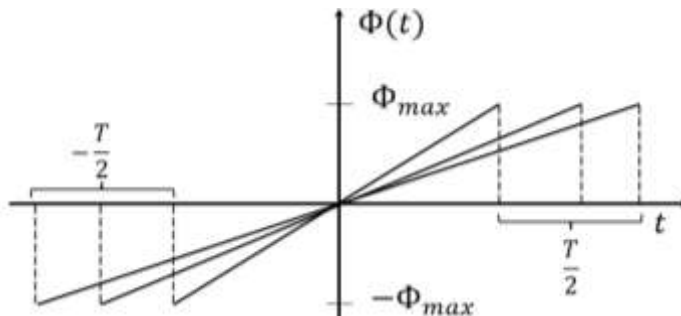


Fig. 1. Model dependence of the wave vector deflection angle on time

From Fig. 1, it is easy to see that the larger T and, accordingly, T_w , the smaller the acceleration at a given range of angles $\Phi_{\max}$, the smaller the range of velocities and, accordingly, the additional dispersion of the Doppler frequency spectrum. Obviously, such terms can be neglected when the strong inequality $1/T_w^2 \ll V^2/a^2$ is satisfied.

Discussion and conclusions

The technology of plane wave compounding uses a periodic repetition of the sequence of waves with different inclinations. Therefore, a periodic extension of all time-dependent physical parameters naturally occurs, which leads to a limitation of the duration of ultrasonic Doppler response signals. The influence of limiting the duration of the response signals and its apodisation by weight windows on the spectral properties of the correlator of inhomogeneity motion and the spectrum of the sensitivity function of the ultrasonic system is determined. In contrast to the spectrum of the correlation function, the width of the sensitivity function spectrum depends on both the size of the measuring volume and the duration of the signals. Within the framework of a simple model of the sensitivity function, the Doppler spectra are considered for different ways of forming response signals using plane wave compounding. A Doppler spectrum is obtained by coherent compounding of signals received at different angles of inclination of waves during their repetition period. Compared to traditional diagnostic systems, the Doppler spectrum width is increased only by limiting the duration of the signals. There is no additional increase in the spectrum width if the compound signals are formed by accumulation with cyclic permutation, in which signals from each new wave angle are added. When forming a Doppler signal directly from Doppler signals at different inclination angles, the spectral width increases both in comparison with the traditional method of sensing with stationary focused ultrasonic fields and with the case of coherent signal accumulation. In terms of the internal physical meaning, the invented increase in the spectral width is connected with a dynamic change in the Doppler angle, which increases the interval of apparent projections of the velocities of motion of inhomogeneities along the direction of transmitting of a plane wave without inclination.

Authors' contribution: Evgen Barannik developed the theoretical formalism; both Evgen Barannik and Mykhailo Hrytsenko authors contributed to the final version of the manuscript and the analytic calculations. Evgen Barannik supervised the project.

Acknowledgments, sources of funding. The study was supported by the Ministry of Education and Science of Ukraine (grant #0122U001269).

References

- Golfetto, C., Ekroll, I.K., Torp, H., Løvstakken, L., & Avdal, J. (2021). Retrospective Transmit Beamforming and Coherent Plane-Wave Compounding for Microvascular Doppler Imaging: A Comparison Study. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 68(4), 1105. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2020.3033719>
- Hyun, D., & Dahl, J.J. (2020). Effects of motion on correlations of pulse-echo ultrasound signals: Applications in delay estimation and aperture coherence. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 147(3), 1323. <https://doi.org/10.1121/10.0000809>

Montaldo, G., Tanter, M., Bercoff, J., Bence, N., & Fink, M. (2009). Coherent plane-wave compounding for very high frame rate ultrasonography and transient elastography. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 56(3), 489. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2009.1067>

Provost, J., Papadacci, C., Demene, C., Gennisson, J., Tanterand, M., & Pernot M. (2015). 3-D ultrafast doppler imaging applied to the noninvasive mapping of blood vessels in Vivo. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 62(8), 1467. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2015.007032>

Sheina, I.V., Kiselov, O.B., & Barannik, E.A. (2020). Power Spectra of Doppler Response Signals from Biological Objects Using Synthetic Aperture Ultrasound. *East European Journal of Physics*, 4, 5. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2020-4-01>

Sheina, I.V., & Barannik, E.A. (2022). Resolution of the Ultrasound Doppler System Using Coherent Plane-Wave Compounding Technique. *East European Journal of Physics*, 1, 116. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2022-1-16>

Shen, C.-C., & Chu, Y.-C. (2021). Beamforming with Complementary Subset Transmit for Ultrasound Coherence-Based Power Doppler Detection in Multi-Angle Plane-Wave Imaging. *Sensors*, 21, 4856. <https://doi.org/10.3390/s21144856>

Trots, I., Nowicki, A., Lewandowski, M., & Tasinkevych, Y. (2011). Synthetic Aperture Method in Ultrasound Imaging. In Masayuki Tanabe (Ed.), *Ultrasound Imaging* (pp. 37–56). InTech. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2768387>

Zheng, C., Zha, Q., Zhang, L., & Peng H. (2018). Signal Eigenvalue Factor for Synthetic Transmit Aperture Ultrasound Imaging. *IEEE Access*, 6, 495.

Отримано редакцією збірника / Received: 20.05.24

Прорецензовано / Revised: 07.06.24

Схвалено до друку / Accepted: 30.09.24

Євген БАРАННИК, д-р. фіз.-мат. наук, проф.

ORCID ID: 0000-0002-3962-9960

e-mail: evgenij.a.barannik@karazin.ua

Харківський Національний університет ім. В.Н. Каразіна, Харків, Україна

Михайло ГРИЦЕНКО, магістр

ORCID ID: 0009-0002-5670-5686

e-mail: mykhailo.hrytsenko@student.karazin.ua

Харківський Національний університет ім. В.Н. Каразіна, Харків, Україна

СПЕКТРИ СИГНАЛІВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДОППЛЕРІВСЬКОГО ВІДГУКУ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ТЕХНОЛОГІЇ КОМПАУНДІНГУ ПЛАСКИХ ХВИЛЬ

Вступ. В останні роки в ультразвуковій діагностиці все більш досліджуваним і вживаним у медичній практиці стали різні варіанти технології синтезованої апертури. Головною перевагою таких методів є підвищення роздільної здатності зображення за рахунок динамічного фокусування під дією випромінювання ультразвуку.

Методи. Розвиток методів когерентного компаундингу сигналів ультразвукового відгуку дозволив покращити спектральні оцінки у спектральній доплерографії порівняно з традиційними доплерівськими методиками. Метою роботи є винайдення й аналіз доплерівських спектрів та його ширини з використанням технології синтезованої апертури, а саме, компаундингу плоских хвиль різними способами формування доплерівських сигналів відгуку.

Результати. У межах простої моделі функції чутливості розглянуто доплерівські спектри за різних способів формування сигналів відгуку з використанням компаундингу плоских хвиль. Винайдено доплерівський спектр при когерентному компаундингу сигналів, отриманих за різних кутів нахилу хвиль

протягом періоду їх повторення. Встановлено, що у процесі формування доплерівського сигналу безпосередньо з доплерівських сигналів, отриманих під різними ракурсами зондування плоскими хвилями, ширина спектра збільшується, як порівняно з традиційним методом зондування стаціонарними сфокусованими ультразвуковими полями, так і у випадку когерентного накопичення сигналів.

Висновки. За внутрішнім фізичним змістом винайдено збільшення ширини спектра, пов'язане з динамічною зміною доплерівського кута, яке збільшує інтервал позірних проєкцій швидкостей руху неоднорідностей уздовж напрямку випромінювання плоскої хвилі без нахилу. Додаткового вивчення потребує вплив нелінійних членів залежно від часу відхилення хвильового вектора від вектора хвиль без нахилу.

Ключові слова: *ультразвук, доплерівський спектр, метод синтезованої апертури, компаундинг плоских хвиль, дисперсія спектра; швидкість руху неоднорідностей.*

Автор М. Гриценко заявляє про відсутність конфлікту інтересів. Член організаційного комітету Є. Баранник заявляє про відсутність конфлікту інтересів та невтручання в процес оцінювання цієї статті відповідно до міжнародних стандартів публікаційної етики. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The author M. Hrytsenko declares no conflicts of interest. The member of the Organizing committee E. Barannik declares no conflict of interest and has not interfered in the evaluation process of this article, in accordance with international publication ethics standards. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

Віктор МАРТИНЮК, д-р біол. наук, проф.

ORCID ID: 0000-0002-5311-3565

e-mail: vittorio.martini.office@gmail.com

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Марія МЕЛЬНИК, канд. біол. наук

ORCID ID: 0000-0003-3965-0388

e-mail: gribovamari@gmail.com

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Інститут фізіології ім. О.О. Богомольця, Київ, Україна

Юлія ЦЕЙСЛЕР, канд. біол. наук, доц.

ORCID ID: 0000-0001-7689-9620

e-mail: yuliya.tseysler@gmail.com

Інститут фізіології ім. О.О. Богомольця, Київ, Україна

ВПЛИВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ ЧАСТОТОЮ 8 ТА 50 Гц НА СКОРОЧЕННЯ ГЛАДЕНЬКОМ'ЯЗОВИХ СМУЖОК ШЛУНКА ЩУРІВ

Вступ. Можливість впливу слабких електромагнітних полів наднизьких частот (ЕМП ННЧ) на живі об'єкти довгий час викликала сумніви та суперечки у дослідників. Але на сьогодні біологічні ефекти електромагнітних полів доведено експериментально на різних рівнях організації: на молекулярному, клітинному, органному і системному.

Методи. У дослідженні використано модель викликаних скорочень гладеньких м'язів шляхом активації кальцієвих каналів мембрани клітин гладеньких м'язів додаванням до розчину Кребса гіперкалієвого розчину (KCl в кінцевій концентрації 80 мМ). Статистичну обробку результатів здійснювали загальноприйнятими методами варіаційної статистики.

Результати. Досліджено вплив ЕМП ННЧ частотою 8 та 50 Гц індукцією 25 мкТл на скорочення гладеньких м'язів шлунка щурів. Показано, що ЕМП ННЧ змінюють силу та характер викликаного K^+ -деполяризацією скорочення гладеньких м'язів шлунка щурів частотнозалежним та часозалежним чином.

Висновки. Важливо, що після припинення впливу ЕМП ННЧ сила та характер скорочення відновлюється до початкового значення. Це свідчить про те, що ефекти ЕМП ННЧ на скорочення гладеньких м'язів мають зворотний характер і не викликають тривалих релаксацийних процесів чи незворотних пошкоджень.

Ключові слова: гладенькі м'язи, ізометричне скорочення, вплив електромагнітних полів наднизьких частот.

Вступ

Можливість впливу слабких електромагнітних полів наднизьких частот (ЕМП ННЧ) на живі об'єкти довгий час викликала у дослідників сумніви та суперечки. Але сьогодні біологічні ефекти електромагнітних полів доведено експериментально на різних рівнях організації: на молекулярному, клітинному, органному і системному (Martynyuk et al., 2012). Водночас, незважаючи на емпіричні докази, єдиної загальноприйнятої теорії, яка б пояснювала первинні

© Мартинюк Віктор, Мельник Марія, Цейслер Юлія, 2024

механізми дії ЕМП на біологічні об'єкти поки що немає. На сьогодні дослідники дотримуються ідеї щодо визначальної ролі іонів кальцію та інших іонів у розвитку біологічних ефектів ЕМП ННЧ. Існують переконливі докази впливу слабких ЕМП ННЧ на кальцієвий гомеостаз у клітинах різних типів (Martyniuk et al., 2012). Але незважаючи на великий масив даних, вплив ЕМП ННЧ на гладенькі м'язи, скорочення яких контролюється іонами K^+ і Ca^{2+} (Ratz et al., 2005), залишається мало вивченим. Тому метою роботи стало дослідження впливу ЕМП частотою 8 і 50 Гц та індукцією 25 мкТл на викликані K^+ -деполяризацією скорочення гладеньких м'язів шлунка щурів. Обрання цих частот обумовлено їхньою біоефективністю (Martyniuk et al., 2012; Pophof et al., 2023).

Методи

У наших дослідженнях використано модель викликаних скорочень гладеньких м'язів шляхом активації кальцієвих каналів мембрани клітин гладеньких м'язів додаванням до розчину Кребса гіперкальцієвого розчину (KCl у кінцевій концентрації 80 мМ). Додавання гіперкальцієвого розчину приводить до скорочення гладеньком'язових клітин завдяки деполяризації плазматичної мембрани і, як наслідок, потужного входу кальцію через активовані потенціалкероовані кальцієві канали. Препарати гладеньких м'язів готували зі шлунка білих безпородних щурів. Гладеньком'язову тканину корпусу шлунка промивали та відчищали від сполучної тканини в нормальному розчині Кребса. Свіжо вилучену гладеньком'язову тканину нарізали на смужки 1,5 мм шириною та 10 мм довжиною. Смужки вирізали в напрямку розташування повздовжнього шару гладеньких м'язів. За допомогою утримувальних гачків смужки закріплювали в експериментальній камері об'ємом 2 мл з проточним нормальним розчином Кребса (швидкість протікання 4 мл/хв), у якій за допомогою термостата підтримували постійну температуру 37 °С. Реєстрацію скорочень смужок гладеньких м'язів здійснювали в ізометричному режимі за допомогою тензометричної системи зі світлодіодним датчиком реєстрації механічного напруження, яку створили інженери ННЦ "Інститут біології та медицини" Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Імпульсне електромагнітне поле частою 8 і 50 Гц генерували за допомогою котушки Гельмгольца. Сигнали генерувалися серійним генератором сигналів спеціальної форми Г6-28. Імпульси ЕМП ННЧ були прямокутної форми зі змінною полярністю за один період коливань. Індукцію ЕМП ННЧ контролювали мікротесламетром Г-79 і магнітометром, у якому сенсором магнітного поля був датчик Холла. Величина індукції ЕМП становила 25 мкТл. Електромагнітний фон у діапазоні 5 Гц – 20 кГц у лабораторії під час проведення експериментів не перевищував рівня 80 нТл, що на декілька порядків менше інтенсивності ЕМП, яка була досліджена в експерименті. Статистичну обробку результатів здійснювали загальноприйнятими методами варіаційної статистики.

Результати

Відомо, що фазове скорочення зумовлене транзйєнтним вивільненням кальцію з саркоплазматичного ретикулуму (Ratz et al., 2005), тоді як тонічне – входом кальцію через потенціалкероовані кальцієві канали. Паттерни скорочення в нашому експерименті за часовою динамікою були типовими для

викликаних K^+ -деполяризацією скорочень гладеньких м'язів шлунка. Викликані скорочення гладеньких м'язів шлунка складаються із двох компонентів: фазового скорочення (короткочасного і сильнішого, що має характер "спайку") та тонічного скорочення (помірного плато).

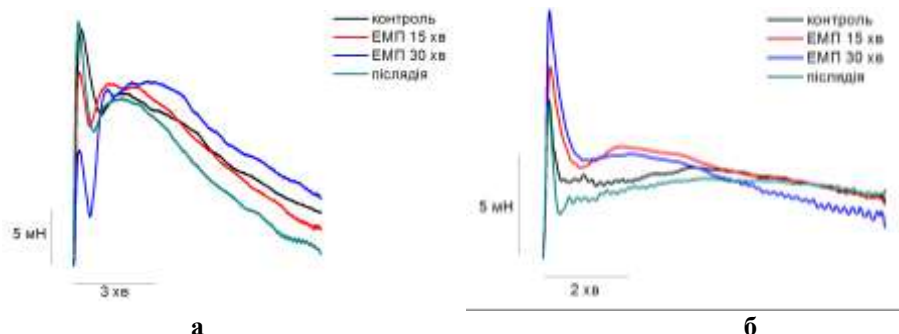


Рис. 1. Типові паттерни викликаного K^+ -деполяризацією ізометричного скорочення гладеньком'язових смужок шлунка щурів за відсутності дії поля (контроль), після 15 хв і після 30 хв впливу ЕМП 8 Гц (а) та 50 Гц (б) і після вимкнення поля (післядія)

ЕМП частотою 8 Гц (рис. 1, а) пригнічувало фазове скорочення. Це пригнічення мало часозалежний характер. Після 15-хвилинного впливу ЕМП частотою 8 Гц амплітуда скорочення зменшувалась на 13 % відносно контролю ($P < 0,05$, $n = 12$), а після 30-хвилинного – на 39 % ($P < 0,05$, $n = 12$) (рис. 2, а). ЕМП частотою 50 Гц навпаки, збільшувало амплітуду фазного скорочення із часозалежним характером. Після 15 хв дії ЕМП амплітуда скорочення збільшувалась на 11 % відносно контролю ($P < 0,05$, $n = 12$), тоді як після 30-хвилинної дії – на 32 % ($P < 0,05$, $n = 12$) порівняно з контролем (рис. 2, б).

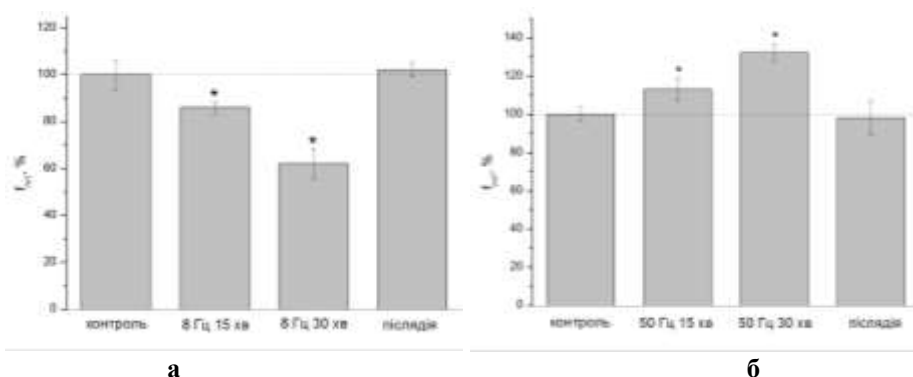


Рис. 2. Зміна максимальної амплітуди фазового скорочення, викликаного K^+ -деполяризацією, під впливом ЕМП частотою 8 Гц (а) і 50 Гц (б) упродовж 15 і 30 хв та після вимкнення поля (післядія) відносно контролю (* – $P < 0,05$ порівняно з контролем).

Дані представлені середнім значенням $\pm$ S.E.M.; $n = 12$)

Амплітуда тонічного скорочення принципово не змінювалась під впливом ЕМП. Через 15 хв вона збільшувалась на 4 %, а через 30 хв – на 5 % ($P < 0,05$, $n = 12$) (рис. 3, а, б).

Аналіз результатів показав, що під впливом ЕМП 8 Гц збільшувався час досягнення максимальної амплітуди тонічного скорочення (рис. 4, а). При чому, як і під час впливу поля на силу скорочення, ефект мав часозалежний характер: через 15 хв впливу час збільшувався на 12 % порівняно з контролем ($P < 0,05$, $n = 12$), тоді як через 30 хв – на 25 % ($P < 0,05$, $n = 12$).

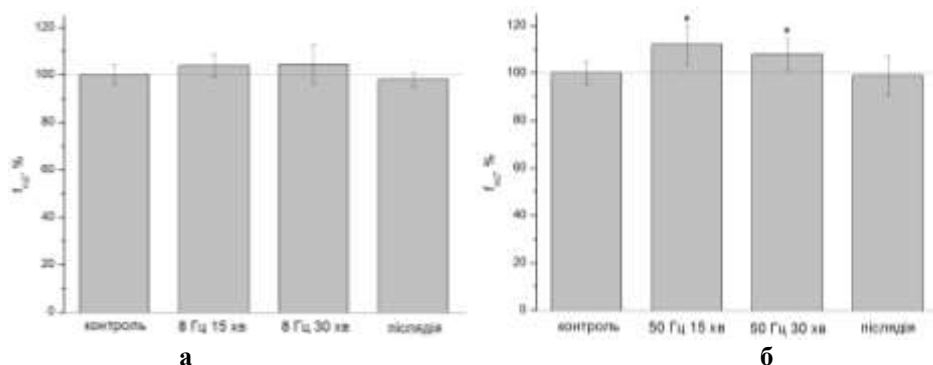


Рис. 3. Зміна максимальної амплітуди тонічного скорочення, викликаного K^+ -деполяризацією, під впливом ЕМП частотою 8 Гц (а) і 50 Гц (б) упродовж 15 і 30 хв, та після вимкнення поля (післядія) відносно контролю (* – $P < 0,05$ порівняно з контролем).

Дані представлені середнім значенням $\pm$ S.E.M.; $n = 12$)

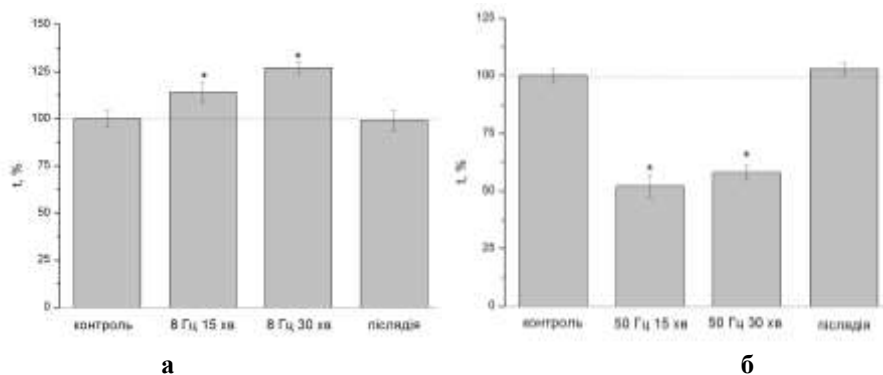


Рис. 4. Зміна часу досягнення максимальної амплітуди тонічного скорочення, викликаного K^+ -деполяризацією, під впливом ЕМП частотою 8 Гц (а) і 50 Гц (б) упродовж 15 і 30 хв та після вимкнення поля (післядія) відносно контролю (* – $P < 0,05$ порівняно з контролем).

Дані представлені середнім значенням $\pm$ S.E.M.; $n = 12$)

Після припинення дії електромагнітного поля кінетика скорочення повністю відновлювалась до початкового значення ($P < 0,05$, $n = 12$) (рис. 4, а).

За умов впливу ЕМП частотою 50 Гц змінювався час досягнення максимальної амплітуди тонічного скорочення (рис. 4 б). Але, на відміну від ефекту ЕМП частотою 8 Гц, час, навпаки, зменшувався, при чому, аж на 49 % через 15 хв впливу, і на 42 % – через 30 хв ($P < 0,05$, $n = 12$) (рис. 4, б). Після припинення дії електромагнітного поля, характер скорочення майже відновлювався до значення контролю ($P < 0,05$, $n = 12$) (рис. 4, б).

Дискусія і висновки

ЕМП ННЧ змінюють силу та характер викликаного K^+ -деполяризацією скорочення гладеньких м'язів шлунка щурів частотозалежним (8 Гц мало пригнічуючий характер, тоді як 50 Гц – активуючий) та часозалежним (із часом ефект збільшувався) чином. Важливо, що після припинення впливу ЕМП ННЧ сила та характер скорочення відновлюються до початкового значення. Це свідчить про те, що ефекти ЕМП ННЧ на скорочення гладеньких м'язів мають зворотний характер і не викликають тривалих релаксаційних процесів чи незворотних пошкоджень.

Внесок авторів: Віктор Мартинюк – концептуалізація, методологія, аналіз і обговорення даних; Марія Мельник – експериментальні дослідження, обробка, аналіз та обговорення даних, написання тексту; Юлія Цейслер – огляд сучасних літературних даних, обговорення даних, адаптація тексту і рисунків.

Подяки, джерела фінансування. Автори висловлюють подяку д-ру біол. наук Ользі Цимбалюк за технічну консультаційну допомогу в проведенні досліджень.

Список використаних джерел

Martynyuk, V.S., Tseyslyer, Yu. V., & Temuryants N.A. (2012). Interference of the Mechanisms of Influence That Weak Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields Have on the Human Body and Animals *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 48(8), 832–846. <https://doi.org/10.1134/S0001433812080087>

Pophof, B., Henschenmacher, B., Kattnig, D.R., Kuhne, J., Vian, A., & Ziegelberger, G. (2023). Biological Effects of Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields from 0 to 100 MHz on Fauna and Flora: Workshop Report. *Health Physics*, 124(1), 39–52. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001624>

Ratz, P.H., Berg, K.M., Urban, N.H., & Miner, A.S. (2005). Regulation of smooth muscle calcium sensitivity: KCl as a calcium-sensitizing stimulus. *Am. J. Physiol. Cell. Physiol.*, 288, C769–C783. <https://doi.org/10.1152/ajpcell.00529.2004>

References

Martynyuk, V.S., Tseyslyer, Yu. V., & Temuryants N.A. (2012). Interference of the Mechanisms of Influence That Weak Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields Have on the Human Body and Animals *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 48(8), 832–846. <https://doi.org/10.1134/S0001433812080087>

Pophof, B., Henschenmacher, B., Kattnig, D.R., Kuhne, J., Vian, A., & Ziegelberger, G. (2023). Biological Effects of Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields from 0 to 100 MHz on Fauna and Flora: Workshop Report. *Health Physics*, 124(1), 39–52. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001624>

Ratz, P.H., Berg, K.M., Urban, N.H., & Miner, A.S. (2005). Regulation of smooth muscle calcium sensitivity: KCl as a calcium-sensitizing stimulus. *Am. J. Physiol. Cell. Physiol.*, 288, C769–C783. <https://doi.org/10.1152/ajpcell.00529.2004>

Отримано редакцією збірника / Received: 17.06.24

Прорецензовано / Revised: 03.07.24

Схвалено до друку / Accepted: 30.09.24

Viktor MARTYNIUK, д-р біол. наук, проф.

ORCID ID: 0000-0002-5311-3565

e-mail: vittorio.martini.office@gmail.com

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Maria MELNYK, канд. біол. наук

ORCID ID: 0000-0003-3965-0388

e-mail: gribovamari@gmail.com

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine,

Bogomoletz Institute of Physiology, Kyiv, Ukraine

Yuliya TSEYSLER, канд. біол. наук, доц.

ORCID ID: 0000-0001-7689-9620

e-mail: yuliya.tseysler@gmail.com

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

EFFECT OF ELECTROMAGNETIC FIELD WITH FREQUENCY 8 AND 50 Hz ON THE CONTRACTION OF SMOOTH MUSCLE STRIPS OF THE STOMACH OF RATS

Introduction. *The possibility of the influence of weak electromagnetic fields of ultra-low frequencies (EMFs of ultra-low frequencies) on living objects has long caused doubts and disputes among researchers. However, today the biological effects of electromagnetic fields have been experimentally proven at different levels of organization: at the molecular, cellular, organ and systemic levels.*

Methods. *Our studies used a model of evoked smooth muscle contractions by activating calcium channels in the smooth muscle cell membrane by adding hyperpotassium solution (KCl at a final concentration of 80 mM) to Krebs solution. Statistical processing of the results was carried out using generally accepted methods of variational statistics.*

Results. *The effect of low-frequency EMF with a frequency of 8 and 50 Hz induced by 25 μ T on the contraction of the smooth muscles of the stomach of rats was investigated. It has been shown that EMFs of NLFs change the strength and nature of K⁺-depolarization-induced contraction of gastric smooth muscles of rats in a frequency-dependent and time-dependent manner.*

Conclusions. *Importantly, after cessation of exposure to LNF EMF, the force and nature of contraction return to their original values. This indicates that the effects of LNF EMF on smooth muscle contraction are reversible and do not cause prolonged relaxation processes or irreversible damage.*

Keywords: *smooth muscles, isometric contraction, influence of ultra-low frequency electromagnetic fields.*

Автори М. Мельник та Ю. Цейслер заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Член редакційної колегії В. Мартинюк заявляє про відсутність конфлікту інтересів та невтручання в процес оцінювання цієї статті відповідно до міжнародних стандартів публікаційної етики. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors M. Melnyk Y. Tseysler declare no conflicts of interest. The member of the Editorial board V. Martyniuk declares no conflict of interest and has not interfered in the evaluation process of this article, in accordance with international publication ethics standards. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

Taras PRYIMAK, PhD Student
ORCID ID: 0000-0001-8600-9097
e-mail: pryjmak488taras1996@ukr.net

Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Ivano-Frankivsk, Ukraine

Ivan GASYUK, DSc (Phys. & Math.), Prof.
ORCID ID: 0000-0001-6410-4640
e-mail: gasyukim@gmail.com

Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Ivano-Frankivsk, Ukraine

Dmytro CHERVINKO, PhD Student
ORCID ID: 0009-0004-4435-1803
e-mail: dmytro.chervinko@gmail.com

Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Ivano-Frankivsk, Ukraine

TRANSFORMATION OF FREQUENCY DISPERSION OF ELECTRICAL PARAMETERS OF LIVER TISSUES DEPENDING ON STORAGE TEMPERATURE

Introduction. Presented article discusses the temporal transformation of frequency characteristics of the few of studied electrical parameters of liver tissues during their storage at temperatures ranging from 2 °C to 35 °C.

Methods. The cells for the studies were made from the plastic body of a 2 ml medical syringe. The ends of the cylindrical sample were in contact with a nickel mesh. Nickel conductors welded to the mesh served as a current collector. Cylindrical samples with a height of 1.2 cm, a diameter of 2 cm and a mass of 1–1.5 g were placed in a specially designed, hermetic thermostat 1/120 SPU under the influence of temperatures of 2 °C, 8 °C, 12 °C, 25 °C and 35 °C for 2, 5, 8, 10 and 14 hours.

Results. The study examines and provides the description of changes in direct current conductivity, the frequency dispersion of the real component of conductivity, tangent of the dielectric loss angle within the frequency range of 0.01 Hz to 100 kHz (the beta-dispersion range) and resonance frequency. The functional relationship between the transformation of the thermal-time dependence of electrical parameters and the degree and nature of morphological changes in biological tissues has been established.

Conclusions. Local values and the direction of monotonicity of the polarization relaxation time function in the studied frequency range can be considered as a criterion for determining the degree and type of destructive changes in experimental tissues which were stored in the air at different temperatures and time periods.

Keywords: impedance spectroscopy, liver tissue, conductivity, temperature, resonant frequency, loss tangent, beta-dispersion, relaxation time.

Introduction

Physical methods for studying biological tissues are effective ways to establish the relationship between their electrical properties and physical parameters. One of the fast, non-invasive, easy-to-use, and reliable methods for analyzing the structural integrity of biomaterial is the method of determining the complex electrical impedance over a wide frequency range (Schmidt et al., 2016, p. 110–118). The

© Pryimak Taras, Gasyuk Ivan, Chervinko Dmytro, 2024

evaluation of tissue structural integrity under pathological processes or harmful effects is also within the scope of impedance spectroscopy (Morgan et al., 2019). For example, in the study (Kenworthy et al., 2018), based on the results of measuring electrical impedance, the authors constructed equivalent electrical circuits of liver tissues damaged by aggressive factors, including gamma radiation and thiourea. Comparing the parameters of the constructed circuits with the results of microscopic examination of the samples allowed the authors to establish the potential correspondence of the circuit model elements to specific cellular environments and structures. Calculating the parameters of the circuits and observing the transformation of the electrical circuit structure, along with their comparison with the results of microscopic analysis, allowed the authors to conclude the probable dependence of structural and parametric study results on the intensity of influencing factors. In the proposed work, an attempt was made to analyze the frequency dispersion of complex electrical parameters of liver tissues under the influence of temperature. The aim was to determine the peculiarities of charge transfer in the electrolyte subsystem of tissues under different degrees of structural degradation.

Methods

Cells for research were made from a plastic body of a 2 ml medical syringe. The ends of the cylindrical sample contacted with a nickel mesh. Nickel conductors, welded to the mesh, served as current conductors. The structure of the experimental equivalent scheme was chosen similarly to the one we provided in previous works (Pryimak et al., 2021, pp. 1–11). Cylindrical samples, 1.2 cm high, 2 cm in diameter, and weighing 1–1.5 g, were placed in a specially designed, hermetic thermostat 1/120 SPU under the influence of temperatures 2 °C, 8 °C, 12°C, 25 °C, and 35°C for 2, 5, 8, 10, and 14 hours. The acquisition of electrical impedance spectra was performed using a standard AUTOLAB PGStat 30 spectrometer in the frequency range of 0.01 Hz – 100 kHz. To reduce the impact of amplitude values of the measurement signal voltage on the condition of organic tissues, the peak potential was reduced to 0–5 mV. The signal was recorded automatically, and the dependencies of the real and imaginary values of specific conductivity (σ' and σ''), dielectric permittivities (ξ' and ξ''), and the loss tangent were constructed and processed using the Origin software. The frequency dispersion of electrical conductivity and dielectric permittivity is determined from Nyquist diagrams using formulas (4, 5). Electrical conductivity is determined by the formula:

$$\sigma = \frac{1}{Z^*} = \frac{S}{\rho^* \cdot l}, \quad (1)$$

where Z^* , ρ^* are the complex impedance and specific electrical resistance, respectively, and S , l are the area and thickness of the sample, respectively; $\omega = 2\pi f$, ε_0 is the electrical constant, and $j = \sqrt{-1}$. From the diagram, $\sigma' - (\sigma'' - \varepsilon_0 \varepsilon_\infty \omega)$ (ε_∞ is the dielectric permittivity at high frequencies) in the low-frequency region, the value of specific direct current conductivity σ_{dc} was determined at different temperatures. The value of ε_∞ is determined from the Cole-Cole diagram (Tarasov, & Titov, 2013,

p. 352–356) $\varepsilon'' - \varepsilon'$ by approximating the experimental curve to the intersection with the abscissa axis (Olekhnovich, Radyush, & Pushkarev, 2012, pp. 2236–2242).

The real ε' and imaginary ε'' dielectric permittivities are determined by the formulas:

$$\varepsilon' = \frac{\rho''(\omega)}{(\rho''(\omega))^2 + (\rho'(\omega))^2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \omega}, \quad (2)$$

$$\varepsilon'' = \frac{\rho'(\omega)}{(\rho''(\omega))^2 + (\rho'(\omega))^2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \omega}. \quad (3)$$

The frequency dependence of the real component of complex conductivity is determined by the formula

$$\sigma'(\omega) = \frac{\rho'(\omega)}{(\rho''(\omega))^2 + (\rho'(\omega))^2}. \quad (4)$$

The frequency dependence of the imaginary component of complex conductivity is determined by the formula

$$\sigma''(\omega) = \frac{\rho''(\omega)}{(\rho''(\omega))^2 + (\rho'(\omega))^2}. \quad (5)$$

Results

Experimentally obtained Nyquist diagrams of the studied samples for different temperatures stored for 2–14 hours are shown in Fig. 1. The frequency range of the obtained spectra is 0.01 Hz to 100 kHz. Z' and $-Z''$ are the real and imaginary components of the impedance, respectively. The high-frequency sections of the spectra are shown in the insets, with arrows indicating the directions of frequency increase.

Decrease in both the real and imaginary parts of the complex impedance was observed across the entire range of measurement frequencies (Fig. 1). The overall appearance of the impedance spectrum, with a clearly defined polarization branch whose slope decreases with decreasing frequency, corresponds to the equivalent circuit model described in previous work (Pryimak et al., 2021, pp. 1–11). This model includes three R-CPE elements in the initial stages of destruction or two R-CPE elements in the final stages, which aligns well with the charge ion transport model in an ordered system containing a number of equivalent elements corresponding to the number of homogeneous regions.

Using relation:

$$R = R' + iR'', \sigma = \frac{1}{R} = \frac{1}{R' + iR''} = \frac{R' - iR''}{R'^2 + R''^2} = \frac{R'}{R'^2 + R''^2} - i \frac{R''}{R'^2 + R''^2};$$

where $\sigma' = \frac{R'}{R'^2 + R''^2}$ and $\sigma'' = \frac{R''}{R'^2 + R''^2}$ are the real and imaginary parts of the system's complex electrical conductivity, respectively. The dependencies $\sigma'(\omega)$ for the selected group of temperatures are shown (Fig. 2). It can be noted that there is a gradual increase in conductivity with increasing temperature and frequency (Fig. 3a). On the other hand, there is a sharp increase in conductivity at 308 K during the 14-hour exposure, with the conductivity level remaining stable for other temperatures within the same time interval (Fig. 2b). The selected frequency range of 0.01 Hz to 100 kHz corresponds to low-frequency ion polarization mechanisms depending on their location relative to the plasma membrane (Abasi et al., 2022,

pp. 495–516) and the passage of current through it (Dean et al., 2008, pp. 165–177), which corresponds to α -dispersion. This result can be caused by an increased concentration of ions accumulated over a long period of temperature exposure in the membrane damage zone.

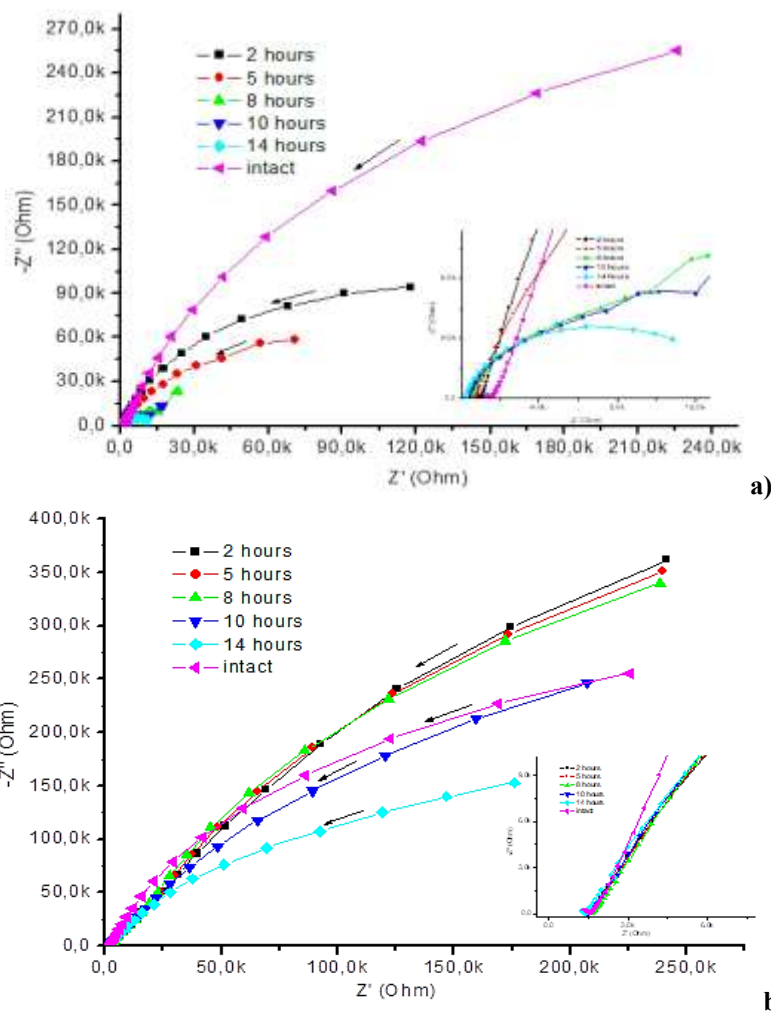


Fig. 1. Impedance spectra of liver tissues stored at a) 271 K, b) 308 K

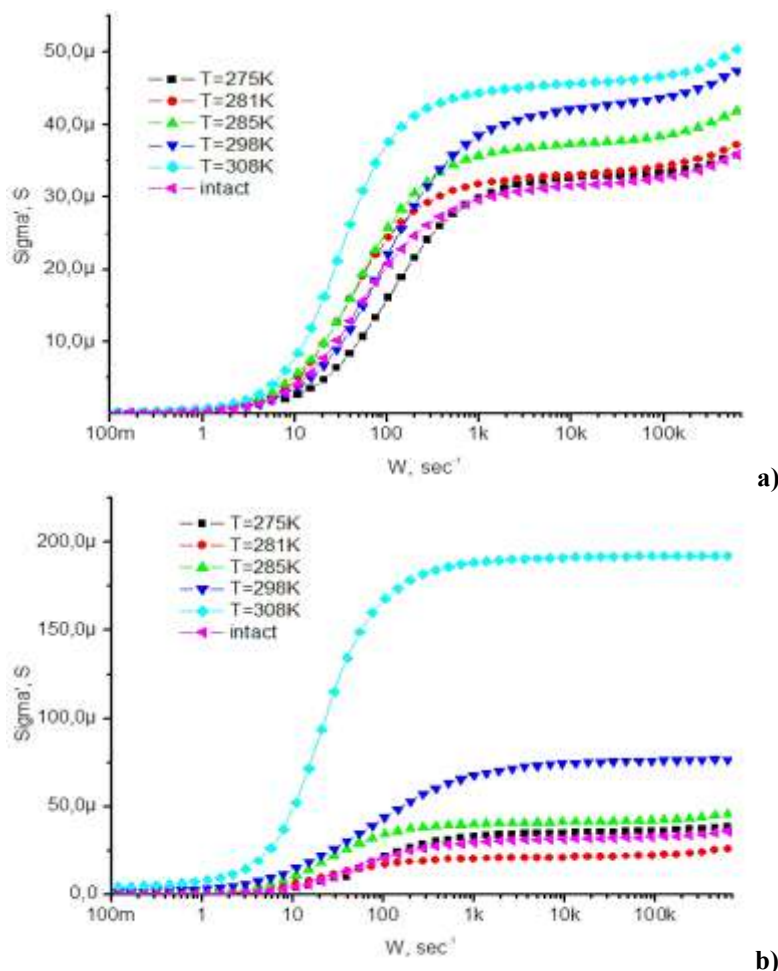


Fig. 2. Conductivity spectra dependence on the frequency of liver tissue samples exposed to temperature for a) 2 hours, b) 14 hours

In order to understand the characteristics of dipole reorientation processes under the influence of an alternating external sinusoidal electric field, the values of the dielectric loss tangent were calculated. The graphs of the dependence $\text{tg } \delta(\omega)$ are presented in Fig. 3. Nature of the dependence of the loss tangent on frequency is extreme. The increase in the minimum value of the loss tangent over time is due to the formation of a large number of dipoles of a certain size due to extensive destruction (Fig. 3a-b). Histological analysis of the samples under such temperature shows the formation of local tissue destruction, blurring of hepatocyte contours in liver samples, and an increase in intercellular spaces, which may indicate plasma membrane destruction and, consequently, a decrease in resistance and increased permeability. This is reflected in the change in the structure of the equivalent circuit from six- to five- and four-element models, particularly at 308 K (Pryimak et al., 2021, pp. 1–11).

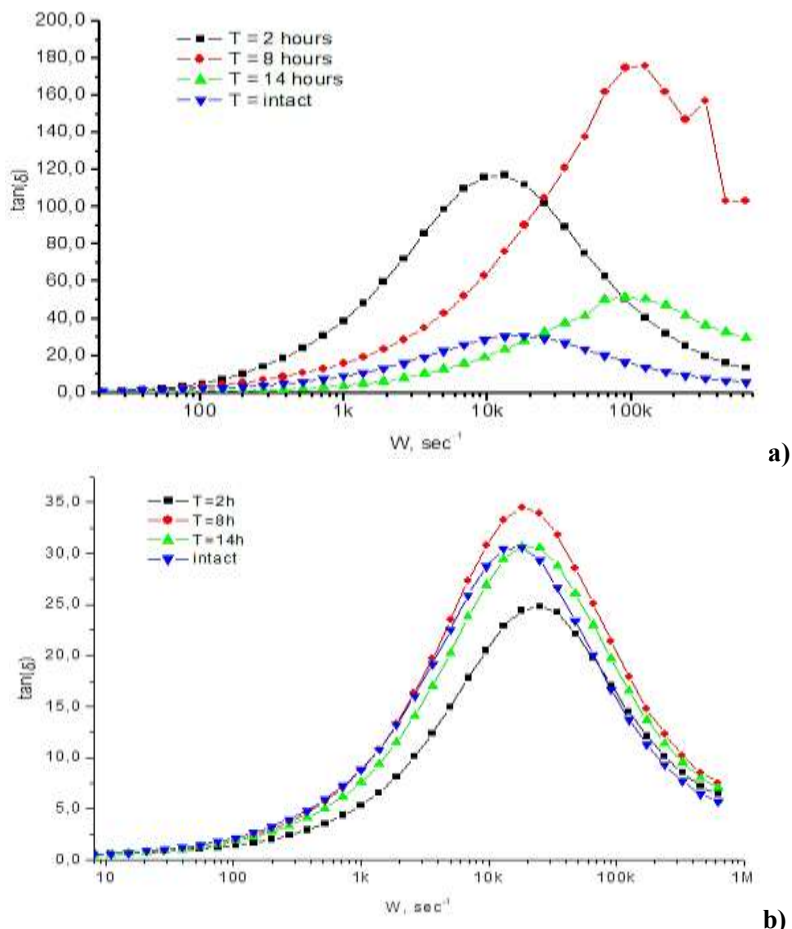


Fig. 3. Dependence of the loss tangent on frequency at a) 275 K, b) 308 K. The high-frequency region of the spectrum is shown in the inset

Increase in temperature, besides causing membrane destruction, is reflected in the increase in the loss tangent and resonant frequency, which is due to the increased number of small-sized dipoles, which can be parts of membrane components and elements of intracellular organelles. This corresponds to the reduced values of the CPE and R parameters of the samples under the influence of 298 K and 308 K, compared to intact samples (Pryimak et al., 2021, pp. 1–11). Additionally, at high temperature, membrane destruction results in a large number of dipole polarization sources, which also contributes to the increase in ω_{res} . Thus, the processes of tissue destruction under the influence of temperature, as a whole, are reflected in the decrease of the complex impedance in both its real and imaginary parts, which can be related to structural membrane destruction, thereby increasing its permeability (Fig. 2a-b). In turn, increasing of the concentration of charge carriers, both external

and internal, in the destruction areas contributes to the increase in conductivity (Fig. 2a-b) in alternating current, and the disappearance of distribution boundaries, which causes greater mobility of the accumulated ions. Elements of the destroyed membrane and the high concentration of ions leads to the formation of a large number of dipoles (Fig. 3a-b) of sufficiently small size, observed when an external alternating electric field is applied.

Discussion and conclusions

The study of the Nyquist diagram parameters of liver tissues stored over a certain time range at different temperatures confirms a two-stage destruction process. In the first stage, there is a change in the concentration and composition elements of charge carriers without prominent signs of morphological structure destruction. The second stage involves structural changes and evidently leads to irreversible destruction. Storing liver tissues at low temperatures (275–285 K) leads to minor changes in the ion subsystem, whereas increasing the temperature and duration of storage leads to significant tissue changes, which, in turn, is reflected in the kinetics of impedance spectrum parameters. The main indicators of the nature and degree of destruction can be the resonant frequency determined from the frequency dependence of the dielectric loss tangent. In the initial stages of destruction, the time dependence of ω_{res} has a decreasing character. The second stage of destructive changes is accompanied by a temporal increase in this value. This characteristic may, in the future, become a technologically controllable parameter for developing a rapid and non-invasive method for characterizing overall damage, potential changes in ion composition, and the degree of destruction of both cells and organs as a whole.

Authors' contribution: Ivan Gasiuk – conceptualization, methodology; Taras Pryimak – methodology, data validation, writing original draft, writing – revising and editing; Dmytro Chervinko – formal and data analysis, writing – revising and editing.

Acknowledgements, sources of funding. We would like to acknowledge members of the Department of Human Anatomy of the IFNMU – Oksana Popadynets, Taras Kotyk, Maria Hryshchuk – for their significant support of our work, advices, materials and practical assistance.

References

- Abasi, S., Aggas, J.R., Garayar-Leyva, G.G., Walther, B.K., & Guiseppi-Elie, A. (2022). Bioelectrical Impedance Spectroscopy for Monitoring Mammalian Cells and Tissues under Different Frequency Domains: A Review. *ACS Measurement Science Au*, 2(6), 495–516. <https://doi.org/10.1021/acsmesuresciau.2c00033>
- Dean, D., Ramanathan, T., Machado, D., & Sundararajan, R. (2008). Electrical impedance spectroscopy study of biological tissues. *Journal of Electrostatics*, 66(3–4), 165–177. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2007.11.005>
- Kenworthy, P., Phillips, M., Grisbrook, T.L., Gibson, W., Wood, F.M., & Edgar, D.W. (2018). An objective measure for the assessment and management of fluid shifts in acute major burns. *Burns and Trauma*, 6. <https://doi.org/10.1186/s41038-017-01>
- Morgan, K., Gamal, W., Samuel, K., Morley, S.D., Hayes, P.C., Bagnaninchi, P., & Plevris, J.N. (2019). Application of Impedance-Based Techniques in Hepatology Research. *Journal of Clinical Medicine*, 9(1), 50. <https://doi.org/10.3390/jcm9010050>

Olekhovich, N.M., Radyush, Y.V., & Pushkarev, A.V. (2012). Mechanisms of dielectric polarization in perovskite ceramics of the relaxor ferroelectrics $(1-x)(\text{NaBi})_{1/2}\text{TiO}_3-x\text{Bi}(\text{ZnTi})_{1/2}\text{O}_3$ ($x < 0.2$). *Physics of the Solid State*, 54(11), 2236–2242. <https://doi.org/10.1134/s1063783412110248>

Pryimak, T., Popadynets, O., Gasiuk, I., & Kotyk, T. (2021). Electrical impedance spectrum transformation of liver tissues under the influence of temperature. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 11(12), 1–11. <https://doi.org/10.9790/9622-1112010111>

Schmidt, F. C., Fuentes, A., Masot, R., Alcañiz, M., Laurindo, J.B., & Barat, J.M. (2016). Assessing heat treatment of chicken breast cuts by impedance spectroscopy. *Food Science and Technology International*, 23(2), 110–118. <https://doi.org/10.1177/1082013216659609>

Tarasov, A., & Titov, K. (2013). On the use of the Cole–Cole equations in spectral induced polarization. *Geophysical Journal International*, 195(1), 352–356. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt251>

Отримано редакцією збірника / Received: 01.06.24

Прорецензовано / Revised: 27.07.24

Схвалено до друку / Accepted: 01.10.24

Тарас ПРИЙМАК, асп.

ORCID ID: 0000-0001-8600-9097

e-mail: pryimak488taras1996@ukr.net

Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,
Івано-Франківськ, Україна

Іван ГАСЮК, д-р фіз.-мат. наук, проф.

ORCID ID: 0000-0001-6410-4640

e-mail: gasyukim@gmail.com

Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,
Івано-Франківськ, Україна

Дмитро ЧЕРВІНКО, асп.

ORCID ID: 0009-0004-4435-1803

e-mail: dmytro.chervinko@gmail.com

Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,
Івано-Франківськ, Україна

ТРАНСФОРМАЦІЯ ЧАСТОТНОЇ ДИСПЕРСІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТКАНИН ПЕЧІНКИ ЗАЛЕЖНО ВІД ТЕМПЕРАТУРИ ЗБЕРІГАННЯ

Вступ. Метод створення схем заміщення, який активно використовується в біоімпедансних дослідженнях, незважаючи на відносну простоту використання, не дозволяє сформувати загальну характеристику процесів транспортування іонів у тканинному середовищі при використанні змінного електричного струму та за умови наявності руйнівного впливу. У запропонованій роботі здійснено спробу аналізу частотної дисперсії комплексних електричних параметрів тканин печінки під впливом температури (2–35 °) з метою встановлення особливостей перенесення зарядів в її електролітній підсистемі тканин за різних ступенів структурної деградації.

Методи. Комірочки для досліджень виготовляли з пластикового корпусу медичного шприца об'ємом 2 мл. Торці циліндричного зразка контактували з нікелевою сіткою. Струмовідводом слугували нікелеві провідники, приварені до сітки. Циліндричні зразки висотою 1,2 см, діаметром 2 см та масою 1–1,5 г поміщались у спеціально сконструйований, герметичний термостат 1/120 СПУ під вплив температур 2 °С, 8 °С, 12 °С, 25 °С та 35 °С протягом 2-х, 5-ти, 8-ми, 10-ти та 14 год.

Результати. Розглянуто зміни провідності за постійного струму, з частотною дисперсією дійсної складової провідності та тангенсом кута

діелектричних втрат у діапазоні частот 0,01 Гц – 100 кГц (діапазон β -дисперсії). Встановлено зв'язок трансформації термочасової залежності електричних параметрів від ступеня та характеру морфологічних змін у біологічній тканині.

Висновки. Показано, що локальні значення та напрямки монотонності функції часу поляризаційної релаксації у досліджуваному діапазоні частот вимірювання спектрів електричного імпедансу може слугувати критерієм ступеня та типу деструктивних змін тканин печінки при її зберіганні в атмосфері повітря за різних температур.

Ключові слова: *імпедансна спектроскопія, тканини печінки, провідність, температура, резонансна частота, тангенс кута втрат, бета-дисперсія, час релаксації.*

Автори Т. Приймак, І. Гасюк та Д. Червінко заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors T. Pryimak, I. Gasyuk and D. Chervinko declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

УДК 535.09+57.043

DOI: <https://doi.org/10.17721/3041-1491/2024.11-26>

Михайло ЗАБОЛОТНИЙ¹, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0009-0004-9852-7560
e-mail: fedcba137@ukr.net

Людмила АСЛАМОВА¹, канд. біол. наук, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0003-1896-9357
e-mail: aslamova258@gmail.com

Максим БАРАБАШ², д-р тех. наук, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0001-5054-5031
e-mail: bashik_77@ukr.net

Галина СОЛЯНИК³, д-р мед. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0002-8657-1263
e-mail: gsolyanik@gmail.com

Віктор ЧЕРНЯК¹, д-р мед. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0001-8424-4691
e-mail: victorchernyak.ohta@gmail.com

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна,

²Технічний центр НАН України, Київ, Україна,

³Інститут ЕПОР НАН України імені Р. Є. Кавецького, Київ, Україна

МОДИФІКАЦІЯ ОПТИЧНИХ СПЕКТРІВ ТА ЦИТОСТАТИЧНОЇ АКТИВНОСТІ ДОКСОРУБІЦИНУ ІОНІЗУЮЧИМ ОПРОМІНЮВАННЯМ

Вступ. Досліджуються закономірності впливу попереднього опромінення електронами фізіологічного розчину на оптичні і цитотоксичні властивості фізіологічного розчину та розчиненого в ньому доксорубіцину з метою підвищення їхньої цитостатичної ефективності.

Методи. Енергія електронів опромінення дорівнювала 1 MeV, поглинена доза була в межах (2...80) кГр. Було зареєстровано, що величина поглиненої дози опромінення впливає на оптичні характеристики фізіологічного розчину в УФ, видимому і в ІЧ-діапазоні. Зміни у спектрах екстинкції фізіологічного розчину залежали як від поглиненої дози, так і від довжини світлової хвилі.

Результати. Встановлено, що радіаційно обумовлені зміни властивостей екстинкції та цитостатичної активності опроміненого фізіологічного розчину тривають 2–4 місяці залежно від величини поглиненої дози. Показано, що інтенсивність флуоресценції фізіологічного розчину, викликаній збудженням на довжині хвилі 260 нм, досягає найбільшого значення за величини поглиненої дози опромінення (10...40) кГр. Доведено, що положення смуг спектрів флуоресценції залежить від величини поглиненої дози. Встановлено, що, незважаючи на перебудову центра флуоресценції, обумовлену радіаційними опроміненням, кількість смуг спектрів залишається сталою.

Висновки. Було показано, що попереднє опромінення ФР перед розчиненням у ньому доксорубіцину приводить до посилення його цитостатичної активності. Цей

© Заболотний Михайло, Асламова Людмила,
Барабаш Максим, Соляник Галина, Черняк Віктор, 2024

ефект найбільш виражений за відносно низьких концентрацій доксорубіцину в розчині. Мінімальна доза поглиненого фізіологічним розчином радіаційного опромінення, за якої фіксуються зміни спектрів розчину доксорубіцину, дорівнює 4 кГр.

Ключові слова: доксорубіцин, цитотоксичність, фізіологічний розчин, високоенергетичні електрони, оптичні спектри, карцинома.

Вступ

Досвід застосування протипухлинної хіміотерапії показав обмеженість її можливостей і низьку ефективність при лікуванні місцево-поширених і дисемінованих форм злоякісних новоутворень. У зв'язку з цим визначення нових біологічно активних матеріалів, дослідження їхніх фізико-хімічних та терапевтичних властивостей, взаємозв'язку між ними та створення на їх основі ефективних і малотоксичних протипухлинних препаратів є одним із найбільш актуальних завдань сучасної фізичної медицини та практичної онкології (Mitola, Falvo, & Bertolini, 2021, pp. 1131–1145). Опубліковані дані (Aslamova et al., 2023, pp. 149–152) показали перспективність неруйнівного способу модифікації як фізичних, так і терапевтичних властивостей, деяких протипухлинних препаратів без зміни їхнього хімічного складу.

Метою роботи є дослідження взаємозв'язку між оптичними спектрами та цитостатичною активністю доксорубіцину, розчиненого в ФР, який був попередньо опромінений високоенергетичними електронами, що може забезпечити зменшення дозового навантаження доксорубіцином в онкології й обумовити мінімізацію побічних негативних ефектів при його застосуванні.

Методи

У процесі досліджень використовувався ФР у герметичних скляних ампулах 5 мл. Розчини препаратів доксорубіцин виготовляли з порошку доксорубіцину (Sigma, США) та фізіологічного розчину (ФР), доводячи концентрацію активного препарату до 5 мг/мл. Опромінення водного розчину хлориду натрію ФР проводили електронами з енергією 1 MeV на резонансному лінійному прискорювачі електронів "Аргус" (тривалість імпульсів – 3,3 мкс; частота імпульсів – 400 Гц) у лабораторії радіаційних технологій Інституту фізики НАН України. Величина поглиненої дози (I) була в межах (2 ... 80) кГр.

Спектри поглинання розчину доксорубіцину у ФР реєстрували за допомогою ІЧ-спектрометра Фур'є (Bruker IFS 66, Німеччина) та спектрофотометра з приставкою дифузного відбиття UV-260 Shimadzu. Флуоресценцію зразків вимірювали за допомогою спектрофлуориметра CaryEclipse (Varian). Для дослідження цитостатичної активності використовували клітини карциноми легені Льюїс (LLC).

Біомедична частина досліджень проводилась згідно зі стандартизованою методикою (Заболотний та ін., 2022, с. 131–139). Були проведені спеціальні дослідження щодо визначення впливу попереднього опромінення ФР на протипухлинні властивості розчиненого в ньому доксорубіцину. Експерименти проводились *in vitro* за використання лінії злоякісних клітин карциноми легені

Льюїса (LLC). Як показник фармакологічної активності використовували цитотоксичну / цитостатичну дію водних розчинів протипухлинних препаратів (з опроміненням та без нього) щодо клітин LLC у дослідях *in vitro*. Для цього пухлинні клітини висаджували в лунки 96-лункової планшети в 0,1 мл поживного середовища (2×10^5 кліт./мл) та інкубували протягом ночі. Після того до клітин додавали препарати в 0,1 мл свіжого середовища у широкому діапазоні концентрацій, які прогресивно зменшувалися. У контрольні лунки додавали свіже середовище в такому ж об'ємі без тест-агента. Кількість живих клітин у лунках через добу інкубації визначали за допомогою МТТ-тесту (Заболотний та ін., 2024, с. 1001–1008).

Результати

Вплив опромінення на властивості ФР ілюструє рис. 1, де наведені спектральні залежності екстинкції (Е) ФР у видимому та УФ-діапазоні від величини поглиненої дози.

У діапазоні поглинання валентних коливань молекулярних груп ОН-НН-СН ($3800\text{--}2400\text{ см}^{-1}$) бачимо (рис. 2) істотне зростання інтенсивності цієї смуги в усіх без винятку зразках з опроміненням ФР. Спостерігається височастотний зсув максимуму цієї смуги відносно смуги поглинання доксоробіцину в неопроміненому ФР.

Окремо були проведені дослідження ІЧ-спектрів поглинання за невеликих значень дози поглиненого ФР опромінення. Було проведено порівняння спектрів поглинання доксоробіцину в неопроміненому та опроміненому розчиннику за $I = 2$ та 4 кГр. Одержані дані досліджень в ІЧ-діапазоні спектра показали, що мінімальною дозою поглиненого розчинником високоенергетичного електронного опромінення, за якої реєструються зміни спектра поглинання, є 4 кГр.

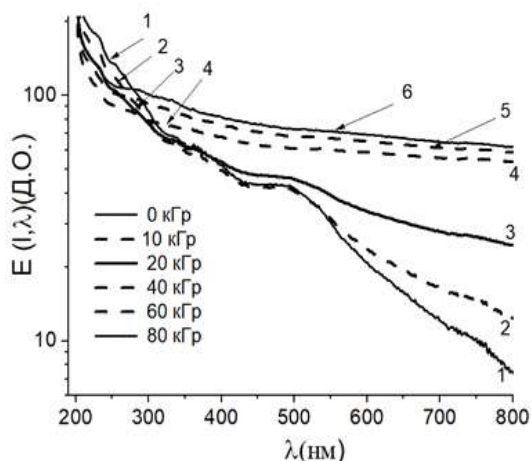


Рис. 1. УФ та видимі спектри поглинання ФР у логарифмічному масштабі за різних значень поглиненої дози електронного опромінення.

(Крива 1 одержана без опромінення, 2 – під час поглиненої дози 10 кГр, 3 – 20 кГр, 4 – 40 кГр, 5 – 60 кГр, 6 – 80 кГр)

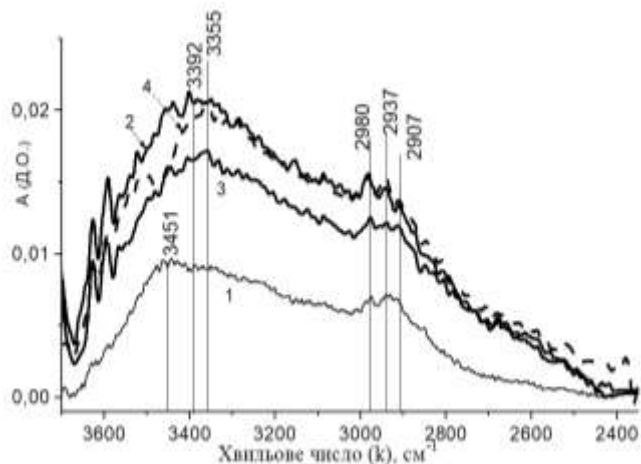


Рис. 2. FTIR-спектри поглинання доксорубіцину, розчиненого ФР за різних I .
(Крива 1 характеризує поглинання за $I = 0$ кГр, крива 2 одержана за $I = 10$ кГр, крива 3 – 40 кГр, крива 4 – 80 кГр)

Для одержання додаткової інформації про властивості силових центрів ФР, що визначають характеристики оптично індукованих переходів, була досліджена флуоресценція ФР і вплив на неї опромінення електронами ФР. Під час дослідження флуоресценції використовувалась доза електронного опромінення, яка дорівнювала 10, 40 та 80 кГр. Довжина хвилі збуджувального лазера дорівнювала $\lambda = 260$ нм. Спектри флуоресценції представлено на рис. 3 та 4.

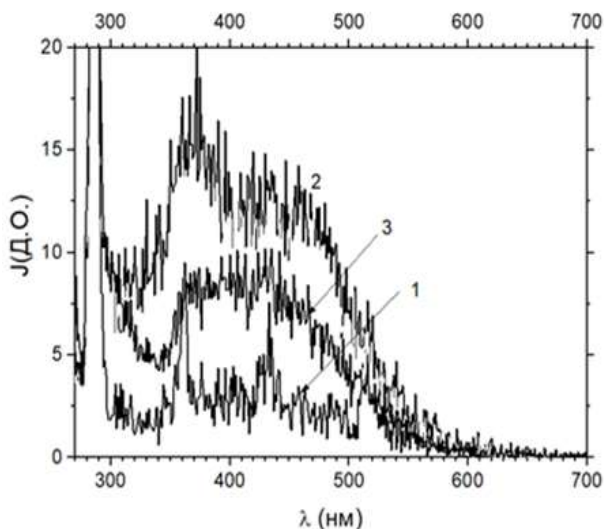


Рис. 3. Оригінальні спектри інтенсивності (J) флуоресценції ФР не опроміненого зразка (1), зразка з $I = 10$ кГр (2) та $I = 80$ кГр (3)

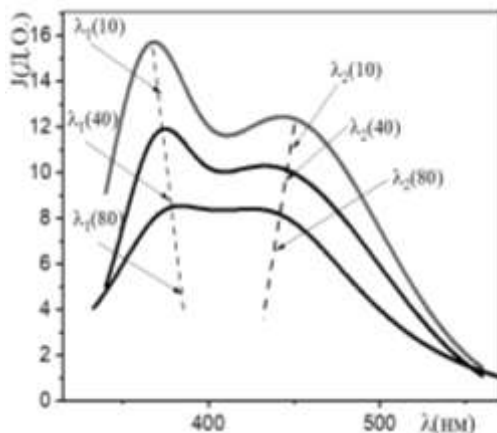


Рис. 4. Спектри інтенсивності (криві 2 і 3 представлені на рис. 3) після шумопригнічення

Особливістю одержаних спектрів є найбільша інтенсивність флуоресценції, що реєструється у зразка з найменшим значенням I опромінених зразків. Було використано розподіли Лоренца під час аналізу спектрів флуоресценції (рис. 3), одержаних після опромінення (сигнал флуоресценції не опроміненого зразка не реєструється на фоні шуму). Зважаючи на це припущення і після позбавлення шуму, спектри флуоресценції будуть мати структуру, наведену на рис. 4. Графіки рис. 4 свідчать, що всі спектри флуоресценції можна представити у вигляді двох симетричних розподілів Лоренца, центри яких $\lambda_1(I) > \lambda_2(I)$ залежать від I . Результати досліджень впливу опромінення ФР на цитотоксичну / цитостатичну дію доксорубіцину ілюструють залежності на рис. 5.

На рис. 5 показано, що інкубація клітин LLC протягом 24 год за наявності доксорубіцину, розчиненого в неопроміненому ФР, призводить до залежного від концентрації зменшення кількості живих клітин (крива 1). Водночас доксорубіцин, розчинений в опроміненому ФР, призводить до посилення цитотоксичної / цитостатичної дії, яка найбільше проявляється за низьких концентрацій (крива 2): зокрема, кількість живих клітин LLC за концентрацій, менших від 3 мкМ, зменшилася в середньому на 20 % порівняно з дією доксорубіцину, розчиненого в неопроміненому ФР.

Рис. 6 ілюструє результати проведених біологічних досліджень, які показали, що опромінення високоенергетичними електронами ФР без додавання доксорубіцину обумовлює виражену цитотоксичну / цитостатичну його дію, ефективність якої залежить від терміну після опромінення. Як видно на діаграмі рис. 6, виживаність пухлинних клітин LLC у середовищі з додаванням ФР, опромінення якого проводилось за 1 місяць до проведення культуральних досліджень, знижувалась на 83 %, а через 4 місяці – 22 %.

Таким чином, отримані результати підтверджують здатність високоенергетичного електронного опромінення розчинника підвищувати фармакологічну активність протипухлинних препаратів у діапазоні низьких концентрацій.

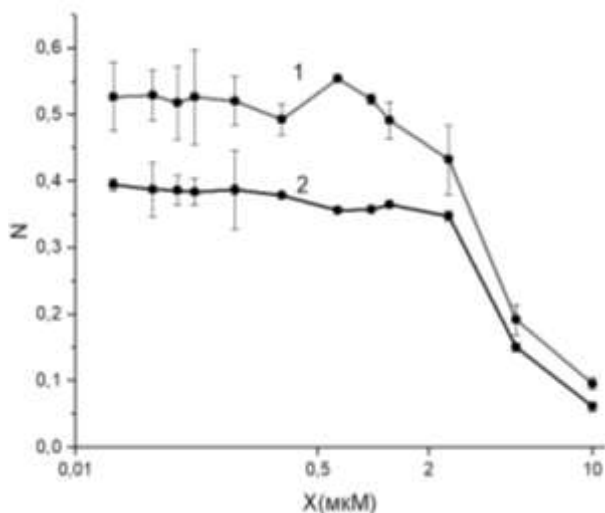


Рис. 5. Кількість (N) живих клітин LLC (у % від відповідного показника в контрольних лунках) після 24-годинної інкубації з доксорубіцином (за різних концентрацій X), розчиненим у неопроміненому (1) та опроміненому 40 кГр (2) ФР

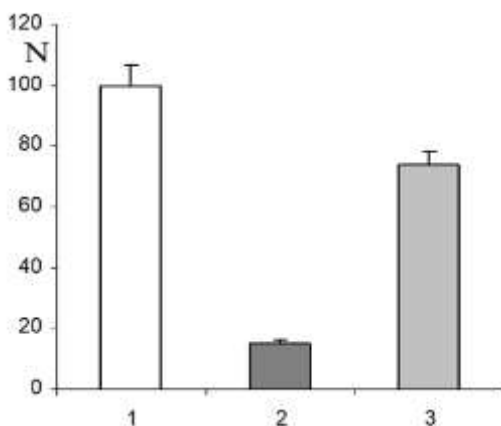


Рис. 6. Вплив опромінення ФР на виживаність клітин карциноми легені Льюїс (1 – ФР без опромінення, 2 – через 1 місяць після опромінення (I = 40 кГр), 3 – через 4 місяці (I = 40 кГр))

Додаткова інформація була одержана в результаті проведеного ТОВ "Юрія-Фарм" дослідження "Порівняльне дослідження гострої токсичності препаратів хлориду натрію при одноразовому парентеральному введенні мишам" (рік виконання 2023, Номер дослідження: № 01082023). У результаті проведених досліджень було зроблено 8 висновків. Останній із них стверджує, що "Результати проведеного дослідження не надають переконливих даних, які б свідчили про відмінності профілів токсичності досліджуваних препаратів."

Зважаючи на високий рівень структурної подібності досліджуваних речовин, з метою виявлення відмінностей їх впливу рекомендовано застосування більш чутливих методів дослідження. Зокрема, дослідження цитотоксичності на культурах клітин різного органного походження".

Дискусія і висновки

1. Досліджено ефект модифікації цитостатичної активності доксорубіцину під час використання попереднього опромінення ФР електронами з енергією 1 МеВ і дозою поглиненого опромінення в межах 10–80 кГр та запропоновано пояснення ефекту за допомогою моделі бабстонів з оцінюванням впливу сусідів на розподіл електричного поля бабстону.

2. Використання попередньо опроміненого ФР доксорубіцину змінює його спектр екстинкції. Мінімальна доза поглиненого розчинником високоенергетичного електронного опромінення (1 МеВ), за якої фіксуються зміни ГЧ-спектрів розчинених в них препаратів, дорівнює 4 кГр.

3. Спектри флуоресценції ФР при збудженні його світлом $\lambda = 260$ нм можна представити у вигляді двох симетричних розподілів Лоренца, центри яких $\lambda_1(I) > \lambda_2(I)$ залежать від I .

4. Вплив високоенергетичного електронного опромінення ФР на ГЧ-спектри та цитостатичну активність доксорубіцину зберігається упродовж 2–4 місяців.

5. Цитостатична активність доксорубіцину, розчиненого в опроміненому ФР, перевищує цитотоксичну/цитостатичну дію щодо клітин LLC доксорубіцину, розчиненого в неопроміненому ФР. Кількість живих клітин LLC під впливом опроміненого ФР доксорубіцину за концентрацій, менших від 3 мкМ, зменшилася до 20 % (залежно від I) порівняно з відповідним показником за не опроміненому ФР.

6. Доведено, що екстремуми спектра поглинання ФР у видимому та ближньому УФ-ділянках спектрів не змінюють свого положення при опроміненні високоенергетичними (1 МеВ) електронами за поглиненої дози $4 \text{ кГр} \leq I \leq 80 \text{ кГр}$.

Визначення природи центрів поглинання світла та флуоресценції ФР, які утворюються під дією високоенергетичного електронного опромінення, потребує додаткових досліджень. Також потрібно продовжити дослідження, започатковані науковою роботою ТОВ "Юрія-Фарм" "Порівняльне дослідження гострої токсичності препаратів хлориду натрію при одноразовому парентеральному введенні мишам" (рік виконання 2023, Номер дослідження: №01082023). У результаті проведеного дослідження було зроблено 8 висновків, останній з яких стверджує, що "Результати проведеного дослідження не надають переконливих даних, які б свідчили про відмінності профілів токсичності досліджуваних препаратів. Зважаючи на високий рівень структурної подібності досліджуваних речовин, з метою виявлення відмінностей їх впливу рекомендовано застосування більш чутливих методів дослідження. Зокрема, це стосується дослідження цитотоксичності на культурах клітин різного органного походження". Проведення цих досліджень

буде стимулювати нові методи збільшення цитостатичних активностей протипухлинних препаратів без використання нанододмішок.

Внесок авторів: Михайло Заболотний – концептуалізація, написання; Людмила Асламова – методологія, валідація даних; Максим Барабаш – валідація даних; Галина Соляник – методологія, валідація даних; Віктор Черняк – концептуалізація.

Подяки, джерела фінансування. Автори роботи висловлюють свою щирю подяку співробітникам ТОВ "ЮРІЯ-ФАРМ" та особливо доктору медичних наук, професору, президенту ТОВ "ЮРІЯ-ФАРМ" Миколі Івановичу Гуменюку за підтримку та надання можливості проведення наукових досліджень нових методів збільшення цитостатичних активностей протипухлинних препаратів без використання нанододмішок.

Список використаних джерел

Заболотний, М.А., Асламова, Л.І., Довбешко, Г.І., Гнатюк, О.П., Неймаш, В.Б., Поварчук, В.Ю., Орел, В.Е., Колесник, Д.Л., Кіркільєвська, Л.М., & Соляник, Г.І. (2022). Вплив опромінення фізіологічного розчину високоенергетичними електронами на фізико-хімічні властивості та цитостатичну активність доксорубіцину. *Ядерна фізика та енергетика*, 23(2), 131–139. <https://doi.org/10.15407/jnpae2022.02.131>

Заболотний, М.А., Асламова, Л.І., Довбешко, Г.І., Гнатюк, О.П., Соляник, Г.І., Данкевич, В.П., Леонов, Д.С., Барабаш, М.Ю., & Черняк, В.А. (2024). Вплив високоенергетичного електронного опромінення фізіологічного розчину на його оптичні характеристики та цитотоксичну/цитодинамічну активність. *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*, 22(2), 1001–1008. <https://doi.org/10.15407/nnn.22.02.481>

Aslamova, L., Zabolotnyy, M., Dovbeshko, G., Solyanik, G., Gnatyuk, O., & Tsapko, M. (2023). Irradiation of physiological solution with high energyelectrons – a way of increase cytotoxic/cytostatic effect. In Urbonavičius B.G. et al. (Eds.), *Medical Physics in the Baltic States 2023* (pp. 149–152). Kaunas University of Technology. <http://medphys.lt/medphys2023/images/MedPhys23/Proceedings%20of%20the%20conference.pdf>

Mitola, G., Falvo, P., & Bertolini, F. (2021). New Insight to Overcome Tumor Resistance: An Overview from Cellular to Clinical Therapies. *Life*, 11(11), 1131. <https://doi.org/10.3390/life11111131>

References

Aslamova, L., Zabolotnyy, M., Dovbeshko, G., Solyanik, G., Gnatyuk, O., & Tsapko, M. (2023). Irradiation of physiological solution with high energyelectrons – a way of increase cytotoxic/cytostatic effect. In Urbonavičius B.G. et al. (Eds.), *Medical Physics in the Baltic States 2023* (pp. 149–152). Kaunas University of Technology. <http://medphys.lt/medphys2023/images/MedPhys23/Proceedings%20of%20the%20conference.pdf>

Mitola, G., Falvo, P., & Bertolini, F. (2021). New Insight to Overcome Tumor Resistance: An Overview from Cellular to Clinical Therapies. *Life*, 11(11), 1131. <https://doi.org/10.3390/life11111131>

Zabolotny, M.A., Aslamova, L.I., Dovbeshko, G.I., Hnatyuk, O.P., Neimash, V.B., Povarchuk, V.Yu., Orel, V.E., Kolesnyk, D.L., Kirkilevska, L.M., & Solyanyk, G.I. (2022). The effect of irradiation of physiological solution with high-energy electrons on the physicochemical properties and cytostatic activity of doxorubicin. *Nuclear Physics and Atomic Energy*, 23(2), 131–139 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/jnpae2022.02.131>

Zabolotnyy, M.A., Aslamova, L.I., Dovbeshko, G.I., Hnatiuk, O.P., Solyanyk, G.I., Dankevich, V.P., Leonov, D.S., Barabash, M.Yu., & Chernyak, V.A. (2024). Effect of high-energy electron irradiation of saline solution on its optical characteristics and cytotoxicity/cytodynamic activity. *Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies*, 22(2), 1001–1008 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/nnn.22.02.481>

Отримано редакцією збірника / Received: 18.06.24

Прорецензовано / Revised: 08.07.24

Схвалено до друку / Accepted: 30.09.24

Mykhaylo ZABOLOTNYY¹, PhD (Phys. & Math.), Senior Researcher
ORCID ID: 0009-0004-9852-7560
e-mail: fedcba137@ukr.net

Lyudmila ASLAMOVA¹, PhD (Biol.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0003-1896-9357
e-mail: aslamova258@gmail.com

Maxim BARABASH², DSc (Engin.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0001-5054-5031
e-mail: bashik_77@ukr.net

Galyna SOLYANIK³, DSc (Med.), Prof.
ORCID ID: 0000-0002-8657-1263
e-mail: gsolyanik@gmail.com

Viktor CHERNYAK¹, DSc (Med.), Prof.
ORCID ID: 0000-0001-8424-4691
e-mail: victorchernyak.ohta@gmail.com

¹Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

²Technical Center of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

³R. E. Kavetskyi Institute of EPO of NASU, Kyiv, Ukraine

MODIFICATION OF OPTICAL SPECTRA AND CYTOSTATIC ACTIVITY OF DOXORUBICIN BY IONIZING RADIATION

Introduction. *The regularities of the effect of prior electron irradiation of saline solution on the optical and cytotoxic properties of saline solution and doxorubicin dissolved in it are studied in order to increase their cytostatic efficiency.*

Methods. *The energy of the irradiation electrons was equal to 1 MeV, the absorbed dose was within (2...80) kGy. It has been reported that the amount of absorbed radiation dose affects the optical characteristics of saline in the UV, visible, and IR regions. Changes in the extinction spectra of the physiological solution depended on both the absorbed dose and the wavelength of the light.*

Results. *It was established that radiation-induced changes in the extinction properties and cytostatic activity of the irradiated physiological solution last 2-4 months, depending on the amount of the absorbed dose. It is shown that the fluorescence intensity of physiological solution caused by excitation at a wavelength of 260 nm reaches the highest value at the value of the absorbed radiation dose (10...40) kGy. It is shown that the position of the bands of the fluorescence spectra depends on the amount of the absorbed dose. It was established that despite the rearrangement of the fluorescence center, the number of spectral bands due to radiation exposure remains constant.*

Conclusions. *It was shown that pre-irradiation of the FR before dissolving doxorubicin in it leads to an increase in its cytostatic activity. This effect is most pronounced at relatively low concentrations of doxorubicin in the solution. The minimum dose of radiation absorbed by the physiological solution, at which changes in the spectra of the doxorubicin solution are recorded, is 4 kGy.*

Keywords: *doxorubicin, cytotoxicity, saline, high-energy electrons, optical spectra, carcinoma.*

Автори М. Барабаш, Г. Соляник та В. Черняк заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Член редакційної колегії М. Заболотний, головний редактор та член організаційного комітету Л. Асламова заявляють про відсутність конфлікту інтересів та невтручання в процес оцінювання цієї статті відповідно до міжнародних стандартів публікаційної етики. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; у рішеннях про публікацію результатів.

The authors M. Barabash, G. Solyanik and V. Chernyak declare no conflicts of interest. The member of the Editorial board M. Zabolotnyy, Editor-in-Chief and a member of the Organizing committee L. Aslamova declare the absence of a conflict of interest and has not interfered in the evaluation process of this article, in accordance with international publication ethics standards. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

Anastasiya RYZHKOVA¹, Student
Scopus ID: 58582842000
e-mail: anastasiia.ryzhkov@gmail.com

Anton GAPONOV¹, PhD Student
Scopus ID: 57202607757
e-mail: antongaponov@ukr.net

Olena PAVLENKO¹, DSc (Phys. & Math.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0001-8838-4798
e-mail: pavlenko@knu.ua

Oksana DMYTRENKO¹, DSc (Phys. & Math.), Prof.
ORCID ID: 0000-0002-4271-4234
e-mail: o_dmytrenko@knu.ua

Andriy MOMOT¹, DSc (Phys. & Math.), Prof.
ORCID ID: 0000-0001-8162-0161
e-mail: momot.andriy@gmail.com

¹Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

COMPUTER SIMULATION OF COMPLEXATION OF BOVINE SERUM ALBUMIN WITH THIOCHROME DYE

Introduction. *Most groups of drugs contain cyclic π -conjugated fragments in their structure, which provide them with the ability to enter into various types of interactions. That is why the study of complexation of proteins with sensors with π -conjugated fragments, which are sensitive to the characteristics of the environment and are characterized by good spectral properties. Such enzymes can be markers of a particular type of interaction, and as a result, they can be functional elements that provide a particular binding of a medicinal agent.*

Methods. *The parameters of complex formation of thiochrome dye with a protein molecule were studied using the methods of molecular dynamics and quantum chemistry.*

Results. *The natural dye thiochrome was chosen as a sensor in the research process. It has a branched aromatic π -conjugated structure, absorption and luminescence in the range of active protein elements, and accordingly, can be a marker of a particular type of interaction and indicate the possibility of being used to create application drugs.*

Conclusions. *Possible binding sites of the components were determined and changes in the electronic structure that can manifest in the optical spectra are predicted.*

Keywords: *bovine serum albumin, tryptophan, thiochrome, conformations, electronic structure.*

Introduction

Biomolecular nanomaterials based on proteins are intensively studied due to their properties of forming ordered self-organized nanostructures, binding and recognizing the specific molecules and therefore could be used as functional materials for bionanotechnologies, the creation of application drugs, ecological

© Ryzhkova Anastasiya, Gaponov Anton, Pavlenko Olena,
Dmytrenko Oksana, Momot Andriy, 2024

biocatalytic boards, tissue engineering (Capezza, & Mezzenga, 2024; Pino et.al., 2024). A key fundamental question is how the functional agents are distributed in proteins pores and channels and what is the interaction. Most groups of drugs in their structure contain cyclic π -conjugated fragments, which often provide them with the ability to enter into various types of interactions. Therefore, the study of complex formation with proteins of sensors with π -conjugated fragments is interesting and important. In this work, the natural dye thiochrome, which has a branched aromatic π -conjugated structure, absorption and luminescence in the range of active elements of the protein, can be a marker of one or another type of interaction. In turn, bovine serum albumin is a well-studied protein that forms films with a crystalline structure, can be an effective prototype for creating the indicated doping matrices. The purpose of the work is to study the peculiarities of the formation of complexes based on bovine serum albumin with thiochrome and the electronic structure to establish the mechanisms of their interaction.

Methods

Molecular dynamics simulations for the biomolecules BSA and thiochrome dye were performed in NAMD programme package, molecular docking in Autodock 4.0. PyMOL and DoGSiteScorer were used for molecular visualization. Quantum chemical calculations for the dye and spectral active aminoacid complexes were performed in Gaussian 09, (TD SCF, DFT 6-31G).

Results

In our experimental study of the the electronic structure of films based on BSA and thiochrome, we have identified a probable binding site of thiochrome within the protein and have assumed formation of a complex involving parallel π - π^* stacking between tryptophan and thiochrome (Gaponov et al., 2024a; 2024b). The absorption maxima of composite BSA protein films with thiochrome shift relative to the maxima typical for films of individual components. Subsequent analysis of the vibrational structure of the film showed minor shifts in the amide I (2 cm^{-1}) and amide II (8 cm^{-1}) bands towards lower frequencies upon the addition of thiochrome to BSA.

We have performed molecular docking simulations to complement the experimental data, providing possible conformations of the ligand within the protein. Let consider the affinity of different conformations of the thiochrome ligand to the BSA protein target using molecular docking. This will help to understand the mechanisms of their interaction and indicate the most likely conformations for quantum chemical research. As a result of the simulations, eight variants of ligand placement were predicted. We identified one conformation in subdomain IB, near tryptophan 134 and another one is in subdomain IIIB (Fig. 1).

Table 1. provides the data of 8 conformational states for the BSA-thiochrome system: the binding energy, characteristics of non-covalent interactions: namely hydrophobic interactions and hydrogen bonds of amino acid residues with the thiochrome dye.

Molecular dynamics simulations (NAMD) over 3 ns revealed that thiochrome's position significantly affects complex stability in subdomain IB, near the tryptophan residue 134 (Fig. 2). In contrast, thiochrome's position in subdomain IIIB was less stable due to its placement in a more hydrophobic pocket.

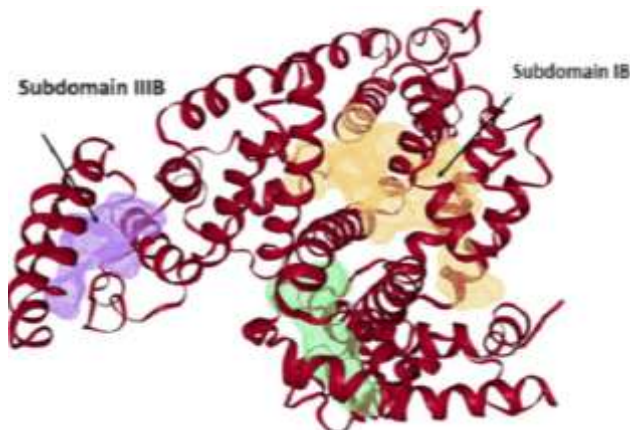


Fig. 1. Visualization of the three ligand binding sites in the BSA protein (coloured with yellow, green and purple) predicted by the DoGSiteScorer algorithm and visualization of the location of thiochrome conformations in PyMol in these subdomains

Table 1
Binding energy E_b , hydrophobic interactions and hydrogen bonds of amino acid residues with the thiochrome dye for BSA-thiochrome system obtained by molecular docking

Stable conformer	E_b , kcal/mol	Hydrogen bonds	Hydrophobic interactions with amino acid residues:
1	-7.27	Phe-506	Phe-506, Lys-524, Leu-528, Val-546, Phe-550, Leu-574, Val-575, Thr-578
2	-7.18	Val-575	Phe-506, Phe-508, Ala-527, Leu-528, Leu-754, Val-575, Thr-578
3	-6.92	Tyr-400	Tyr-400, Lys-524, Leu-528, Val-546
4	-6.54	Pro-113, Leu-115, Tyr-137, Arg-144	Lys-114, Ile-141, Tyr-160, Ile-181, Met-184, Arg-185
5	-6.14	Lys-132, Tyr-160	Asp-129, Lys-132, Lys-136
6	-6.11	Lys-350, Leu-480	Ala-212, Asp-323, Leu-326, Leu-346, Lys-350, Leu-480,
7	-6.09	Pro-298, Leu-301, Leu-304, Arg-336	Ile-297, Leu-301, Leu-304, Arg-336
8	-6.02	Phe-133, Tyr-160	Tyr-137, Glu-140, Ile-181, Arg-185

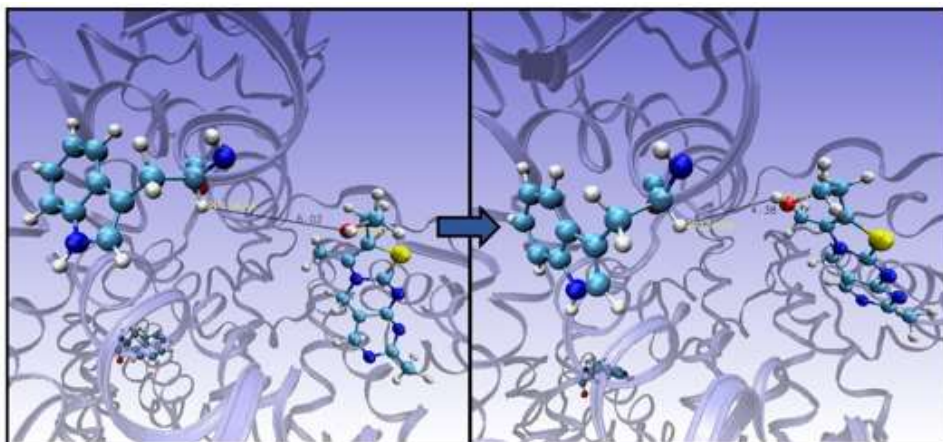


Fig. 2. One of the simulations of changes in the location of thiochrome in the complex with BSA during molecular dynamics

Since the absorption of the BSA protein is mainly caused by tryptophan, let analyze electron transitions with this amino acid. The main electronic transition for thiochrome, tryptophan and the complex is determined by the HOMO-LUMO transition (Gaponov et al., 2024a). Quantum chemical modeling (TD SCF, DFT 6-31G) of the interaction between tryptophan and thiochrome indicated a correlation between the absorption maximum shift and the intermolecular distance. For π - π^* stacking at a distance of 3.5 Å, a red shift of 9 nm was observed, which decreased to 1 nm at a distance of 4.5 Å and disappeared at greater distances.

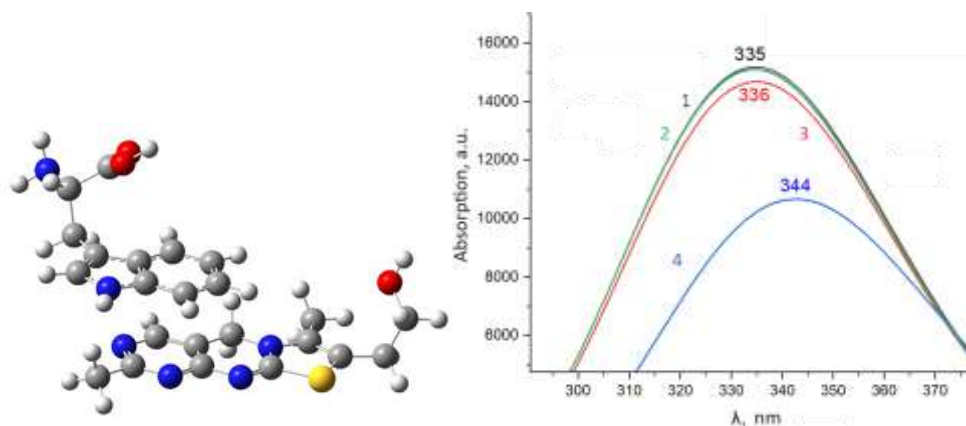


Fig. 3. Calculated spectra of tryptophan-thiochrome complex (on the left side of the fig.3) at different distances d between the components:

1 – thiochrome, 2 – $d = 9$ nm, 3 – $d = 4,5$ nm, 4 – $d = 3,5$ nm,

method of calculation TD SCF (DFT, 6-31G)

The obtained data are in good agreement with our experimental spectra (Gaponov et al., 2024a; 2024b), therefore we can conclude that thiochrome is located near tryptophan, according to molecular dynamics simulations, and affects the optical spectra of the protein. These findings, together with experimental data and results from molecular docking and dynamics, suggest that the most probable location of thiochrome is the pocket in BSA subdomain IB.

Discussion and conclusions

Molecular docking results show on two thiochrome binding sites in the protein. The position of the thiochrome in the protein significantly affects the stability of the complex: the higher stability is observed for position, where the thiochrome is located in less hydrophobic region of the protein. Quantum-chemical modeling of the tryptophan-thiochrome complex confirms their interaction. The studies are important for the use of thiochrome in biosensing of proteins.

Authors' contribution: Anastasia Ryzhkova – calculations, analysis, revision and editing; Andriy Momot, Anton Gaponov – data validation, writing, editing; Olena Pavlenko, Oksana Dmytrenko – conceptualization, methodology, revision and editing.

Acknowledgements, sources of funding. We would like to thank A.I. Lesiuk for his help in learning molecular docking, S.M. Perepelytsia for the Spring school on DNA physics, and for gaining practical knowledge of molecular dynamics.

References

- Capezza, A.J., & Mezzenga, R. (2024). Proteins for Applied and Functional Materials. *Biomacromolecules*, 25, 4615–4618. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.4c00884>
- Gaponov, A.M., Pavlenko, O.L., Dmytrenko, O.P., Kulish, M.P., Ryzhkova, A.S., Lesiuk, A.I., Obernikhina, N.V., Łuszczynska, B., & Kachkovsky, O.D. (2024a). Molecular heteroassociation in films of thiochrome and tryptophan. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 768(3), 71–77. <https://doi.org/10.1080/15421406.2023.2257515>
- Gaponov, A.M., Ryzhkova, A.S., Pavlenko, O.L., Dmytrenko, O.P., Kulish, M.P., Lesiuk, A.I., Kolomys, O.F., Obernikhina, N.V., & Kachkovsky, O.D. (2024b). Spectral features of films of bovine serum albumin with thiochrome. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 1–6. <https://doi.org/10.1080/15421406.2024.2355394>
- Pino, P., Vigani, B., Valentino, C., Ianev, D., Ruggeri, M., Boselli, C., ... & Rossi, S. (2024). Sustainable whey proteins-nanostructured zinc oxide-based films for the treatment of chronic wounds: New insights from biopharmaceutical studies. *International Journal of Biological Macromolecules*, 263, 130655. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130655>

Отримано редакцією збірника / Received: 01.08.24

Прорецензовано / Revised: 14.08.24

Схвалено до друку / Accepted: 01.10.24

Анастасія РИЖКОВА¹, студ.
Scopus ID: 58582842000
e-mail: anastasiia.ryzhkov@gmail.com

Антон ГАПОНОВ¹, асп.
Scopus ID: 57202607757
e-mail: antongaponov@ukr.net

Олена ПАВЛЕНКО¹, д-р фіз.-мат. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0001-8838-4798
e-mail: pavlenko@knu.ua

Оксана ДМИТРЕНКО¹, д-р фіз.-мат. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0002-4271-4234
e-mail: o_dmytrenko@knu.ua

Андрій МОМОТ¹, д-р фіз.-мат. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0001-8162-0161
e-mail: momot.andriy@gmail.com

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОМПЛЕКСОУТВОРЕННЯ БИЧАЧОГО СИРОВАТКОВОГО АЛЬБУМІНУ З БАРВНИКОМ ТІОХРОМОМ

Вступ. Більшість груп лікарських препаратів у своїй структурі містять циклічні π -спряжені фрагменти, які забезпечують їх можливість вступати в різні типи взаємодій. Саме тому дослідження комплексоутворення білків з сенсорами з π -спряженими фрагментами, які чутливі до особливостей навколишнього оточення і володіють гарними спектральними властивостями, можуть бути маркерами того чи іншого виду взаємодії і, як наслідок, функціональними елементами, що забезпечують те чи інше зв'язування лікарського агента.

Методи. У цій роботі дослідження проводилися за допомогою декількох типів комп'ютерних моделювань, зокрема таких, як молекулярний докінг, молекулярна динаміка та квантова хімія.

Результати. Як сенсор у процесі дослідження було обрано природний барвник тіохром, що має розгалужену ароматичну π -спряжену будову, поглинання та люмінесценцію в діапазоні активних елементів білка, відповідно, може бути маркером того чи іншого виду взаємодії і свідчити про можливість бути використаним для створення аплікаційних ліків.

Висновки. Отримані дані відкривають шлях для подальших досліджень механізмів взаємодії π -спряжених молекул з білками.

Ключові слова: бичачий сироватковий альбумін, триптофан, тіохром, конформації, електронна структура.

Автори А. Рижкова, А. Гапонов, О. Павленко, О. Дмитренко та А. Момот заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors A. Ryzhkova, A. Gaponov, O. Pavlenko, O. Dmytrenko and A. Momot declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

Владислав МАКСИМУК¹, студ.
ORCID ID: 0009-0004-0296-7693
e-mail: vlad.maxymuk@gmail.com

Антон ГАПОНОВ¹, асп.
Scopus ID: 57202607757
e-mail: antongaponov@ukr.net

Олена ПАВЛЕНКО¹, д-р фіз.-мат. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0001-8838-4798
e-mail: pavlenko@knu.ua

Оксана ДМИТРЕНКО¹, д-р фіз.-мат. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0002-4271-4234
e-mail: o_dmytrenko@knu.ua

Микола КУЛІШ¹, д-р фіз.-мат. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0002-7409-8560
e-mail: mpkulish@knu.ua

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПЛІВОК ВУГЛЕЦЕВИХ НАНОСТРУКТУР З БАРВНИКАМИ-ФОТОСЕНСИБІЛІЗАТОРАМИ ДЛЯ ФОТОДИНАМІЧНОЇ ТЕРАПІЇ

Вступ. Вуглецеві нанотрубки завдяки унікальним фізичним властивостям, а саме, поглинанню в ІЧ-діапазоні та здатності перетворювати поглинену енергію на теплову, мають великий потенціал застосування у фотодинамічній та фототермічній терапії для лікування ракових захворювань.

Методи. Одноштинні вуглецеві нанотрубки, функціоналізовані октадецилामіном, були розчинені у воді (0.05 мг/мг) при додатковому диспергуванні ультразвуком, а після цього осадили на підкладинки. Методом вакуумного термічного осадження було напилено плівку скварайнового барвника. Спектри оптичного поглинання вимірювались за допомогою спектрофотометра SHIMADZU. Квантово-хімічні розрахунки модельних молекул проведено в програмному пакеті Gaussian 09 напівемпіричними методами PM6, ZINDO.

Результати. Наведено результати досліджень оптичного поглинання композитних плівок на основі вуглецевих нанотрубок, фулеренів C₆₀ з молекулами скварайнових барвників, які зарекомендували себе як фотосенсибілізатори для фотодинамічної терапії в комплексах із фулеренами C₆₀.

Висновки. Досліджено експериментальні спектри поглинання нанокompозитних плівок скварайнових барвників з одноштинними вуглецевими нанотрубками порівняно з фулеренами C₆₀. Зміни оптичних властивостей пояснено з урахуванням змін гібридизації атомів вуглецю на прикладі модельних π-стекових комплексів фулеренів C₇₀ зі скварайновими барвниками за допомогою квантово-хімічних розрахунків.

Ключові слова: багатостинні вуглецеві нанотрубки, фотосенсибілізатори, фулерени.

© Максимук Владислав, Гапонов Антон, Павленко Олена,
Дмитренко Оксана, Куліш Микола, 2024

Вступ

Вуглецеві нанотрубки завдяки унікальним фізичним властивостям, а саме, поглинанню в ІЧ-діапазоні та задатності перетворювати поглинену енергію на теплову, мають великий потенціал застосування у фотодинамічній та фототермічній терапії для лікування ракових захворювань (Naief et al., 2023; Villa et al., 2021; Wang et al., 2014). На можливість використання цих структур у цьому діапазоні впливають як параметри вуглецевих нанотрубок (діаметр, хіральність), так і спосіб модифікації їх поверхні. Модифікатори можуть забезпечити поглинання збуджувального випромінювання у визначеному інтервалі ІЧ-діапазону, ефективно перенесення енергії до нанотрубок, підвищуючи фотодинамічний та фототермічний ефекти, а також слугувати флуоресцентними візуалізаторами, покращувати розчинність, модулювати фотофізичні властивості тощо. Такі перспективи вимагають систематичних і широких досліджень властивостей комплексів на основі нанотрубок та фотосенсибілізаторів, як їхніх активних елементів, так і механізмів їх взаємодії (Naief et al., 2023; Villa et al., 2021; Wang et al., 2014). У цій роботі наведено результати досліджень оптичного поглинання композитних плівок на основі вуглецевих нанотрубок, фулеренів C_{60} з молекулами сквараїнових барвників, які зарекомендували себе як фотосенсибілізатори для фотодинамічної терапії в комплексах із фулеренами C_{60} . Обраний барвник має поглинання у червоному діапазоні спектра, надзвичайно чутливий до середовища, може розчинятися в багатьох розчинниках і не токсичний для клітин за умови відсутності дії світла. Ці властивості зумовили інтерес до механізмів його взаємодії з нанотрубками, що на сьогодні ще не досліджено.

Метою роботи є вивчення спектрів оптичного поглинання барвників як фотосенсибілізаторів у взаємодії з одностінними вуглецевими нанотрубками в плівках.

Методи

Одностінні вуглецеві нанотрубки, функціоналізовані октадециламіном, були розчинені у воді (0.05 мг/мг) при додатковому диспергуванні ультразвуком, а після цього осаджені на підкладки. Наступним кроком методом вакуумного термічного осадження було напилено плівку сквараїнового барвника. Товщини плівок фулеренів, барвників не перевищували 100 нм. Спектри оптичного поглинання вимірювались за допомогою спектрофотометра SHIMADZU. Квантово-хімічні розрахунки модельних молекул, наведених на рис. 1, проведено в програмному пакеті Gaussian 09 напівемпіричними методами PM6, ZINDO.

Результати

На рис. 2. наведено спектри оптичного поглинання плівки барвника, крива 1 і плівки нанотрубок, крива 3. Для порівняння поведінки спектра барвника, що нанесений на плівку фулеренів C_{60} , наведено криву 2, що відповідає плівці фулерен-барвник та 2', що відповідає поглинанню плівки фулеренів. Цей сквараїновий барвник у розчині дихлорметану має пік поглинання за 631 нм

(Garonov et al., 2022). Проте в результаті міжмолекулярної взаємодії, що обумовлена нерівномірним розподілом заряду вздовж його хромофору, барвники формують упорядковані ансамблі (найпростіший випадок – димери, тримери), що приводить до зсуву їхніх спектрів поглинання, залежно від типу нанесення – це можуть бути *J*- та *H*-агрегати (Coates, 1969). У цьому випадку барвник наносився в режимі, що сприяє формуванню *J*-агрегації, для якого зсув спостерігається в червоний діапазон спектра, а пік поглинання розташований за 680 нм, (крива 1).

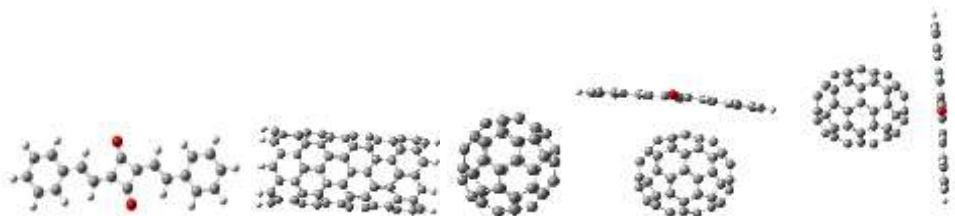


Рис. 1. Геометрія модельної молекули скварайнового барвника, нанотрубки хіральністю (8, 0), фулеренів C_{60} , фулеренів C_{70} зі скварайновим барвником у двох варіантах розташування барвника: біля більшого та меншого діаметрів C_{70}

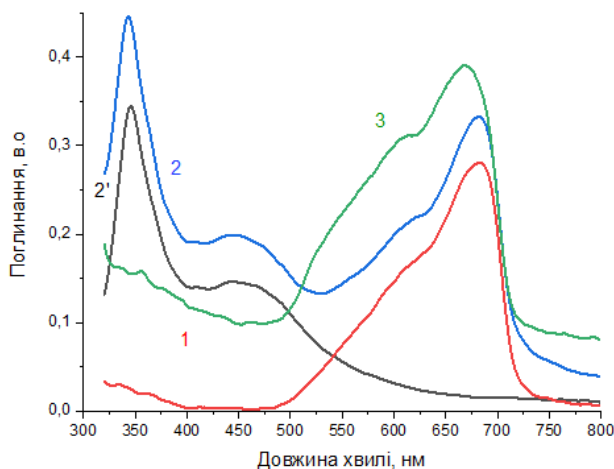


Рис. 2. Нормовані спектри оптичного поглинання для плівок барвника (крива 1); плівки нанотрубка–барвник (крива 3), плівки фулерен–барвник (крива 2 та 2') – плівки фулеренів. Підкладка кварц. Товщини плівок фулеренів $d = 100$ нм. Товщини плівок нанесених барвників $d = 60$ нм

Як видно з рис. 2, спектри поглинання плівки барвника (крива 1) і барвника на плівці фулеренів C_{60} , (крива 3) відрізняються не істотно, у той час як напilenня на нанотрубки сприяє зсуву поглинання обох максимумів спектра на 13 нм і характеризується більш виразним плечем у синьому діапазоні

спектра (крива 3). Природу взаємодії барвників із фулеренами описано в (Pavlenko et al., 2018), проте випадок з нанотрубками потребує перевірки кількох причин, які модифікують агрегацію цих молекул при взаємодії з поверхнею наноструктур. Однією з найважливіших причин може бути зміна типу гібридизації атомів вуглецю нанотрубок порівняно з фулеренами C_{60} . Відомо, що атоми вуглецю в графені мають тип гібридизації sp^2 , у той час як викривлення поверхні в результаті згортання площини графену у фулерен і поява п'ятикутників призводить до підмішування σ -зв'язків та зміни типу гібридизації від sp^2 до $sp^{2,278}$ (Haddon, 1993). Атоми вуглецю на C_{70} через асиметрію молекули порівняно з C_{60} мають також різні ступені гібридизації, тому розглянемо, чи впливає тип розташування барвника біля фулерену з C_{70} у двох крайніх випадках: біля більшого і меншого його діаметрів, де спостерігається зміна ступеня перекриття електронної густини (рис. 1).

Отримані в результаті квантово-хімічних розрахунків дані комплексів, після їх порівняння між собою та з вихідними даними, для окремих компонентів відрізняються. Зокрема, значення молекулярних орбіталей НОМО та LUMO, які відповідають за електронний перехід, для окремої молекули фулерену C_{70} становлять $-9,2$ еВ та $-3,16$ еВ, відповідно. Для окремих молекул барвників НОМО та LUMO набувають таких значень: для скварайнового барвника $-8,16$ еВ та $-2,95$ еВ. Для комплексів скварайнового барвника та фулерену C_{70} спостерігається зниження НОМО-рівня відносно рівнів окремого барвника в обох випадках. При цьому рівень LUMO для комплексу локалізований на фулерені і опускається відносно значення LUMO окремого фулерену, що свідчить про розщеплення його вироджених рівнів у незалежному стані. У цілому щільна комплексів звужується в обох випадках локалізацій барвника відносно рівнів окремого барвника: локалізації біля більшого радіуса щільна становить $5,09$ еВ; для локалізації біля меншого радіуса $-5,08$ еВ.

Дискусія і висновки

Отже, у процесі комплексоутворення скварайнового барвника з вуглецевими наноструктурами з різним ступенем гібридизації атомів вуглецю відбувається трансформація електронної структури комплексів, що супроводжується змінами електронної щільності і, відповідно, може проявлятися в зміщенні піків поглинання та впливати на можливості застосування барвників як фотосенсибілізаторів. Встановлене розширення діапазону поглинання барвників під час осадження на вуглецеві нанотрубки порівняно з фулеренами C_{60} вказує на доцільність застосування даних барвників у комплексах з нанотрубками, оскільки сприятиме підвищеній абсорбції електромагнітної енергії комплексами нанотрубка–барвник з можливістю подальшого її перетворення для позитивних ефектів у фотодинамічній терапії.

Внесок авторів: Владислав Максимук – розрахунки, аналіз даних; Антон Гапонов – експериментальні дослідження, аналіз даних; Олена Павленко – концептуалізація, методологія, написання – перегляд і редагування; Оксана Дмитренко, Микола Куліш концептуалізація, методологія.

Список використаних джерел

- Coates, E. (1969). Aggregation of dyes in aqueous solutions. *Journal of the Society of Dyers and Colourists*, 85(8), 355–368. <https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.1969.tb02909.x>
- Gaponov, A.M., Pavlenko, O.L., Dmytrenko, O.P., Kulish, M.P., Pinchuk-Rugal, T.M., Busko, T.O., Nikolaienko, T.Yu., Neimash, V.B., & Kachkovsky, O.D. (2022). Spectral Properties of Thin Films of Squaraine Dyes, Deposited on Silver and Gold Nanoparticles. In O. Fesenko, L. Yatsenko (Eds.), *Nanoelectronics, Nanooptics, Nanochemistry and Nanobiotechnology, and Their Applications* (297, pp. 339–354). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42708-4_22
- Haddon, R.C. (1993). Chemistry of the fullerenes: The manifestation of strain in a class of continuous aromatic molecules. *Science*, 261(5128), 1545–1550. <https://doi.org/10.1126/science.261.5128.1545>
- Naief, M.F., Mohammed, S.N., Mayouf, H.J., & Mohammed, A.M. (2023). A review of the role of carbon nanotubes for cancer treatment based on photothermal and photodynamic therapy techniques. *Journal of Organometallic Chemistry*, 999, 122819. <https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2023.122819>
- Pavlenko, O.L., Brusentsov, V.A., Dmytrenko, O.P., Kulish, M.P., Sendiuk, V.A., Kobzar, P.Y., ... & Prostota, Y.O. (2018). Spectral and quantum-chemical study of interaction between fullerenes and squaraine dyes. *Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies*, 16(1), 31–40. <https://doi.org/10.15407/nnn.16.01.031>
- Villa, I., Villa, C., Crapanzano, R., Secchi, V., Tawfilas, M., Trombetta, E., ... & Monguzzi, A. (2021). Functionalized scintillating nanotubes for simultaneous radio-and photodynamic therapy of cancer. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(11), 12997–13008. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c02504>
- Wang, L., Shi, J., Liu, R., Liu, Y., Zhang, J., Yu, X., ... & Zhang, Z. (2014). Photodynamic effect of functionalized single-walled carbon nanotubes: a potential sensitizer for photodynamic therapy. *Nanoscale*, 6(9), 4642–4651. <https://doi.org/10.1039/C3NR06835H>

References

- Coates, E. (1969). Aggregation of dyes in aqueous solutions. *Journal of the Society of Dyers and Colourists*, 85(8), 355–368. <https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.1969.tb02909.x>
- Gaponov, A.M., Pavlenko, O.L., Dmytrenko, O.P., Kulish, M.P., Pinchuk-Rugal, T.M., Busko, T.O., Nikolaienko, T.Yu., Neimash, V. B., & Kachkovsky, O.D. (2022). Spectral Properties of Thin Films of Squaraine Dyes, Deposited on Silver and Gold Nanoparticles. In O. Fesenko, L. Yatsenko (Eds.), *Nanoelectronics, Nanooptics, Nanochemistry and Nanobiotechnology, and Their Applications* (297, pp. 339–354). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42708-4_22
- Haddon, R.C. (1993). Chemistry of the fullerenes: The manifestation of strain in a class of continuous aromatic molecules. *Science*, 261(5128), 1545–1550. <https://doi.org/10.1126/science.261.5128.1545>
- Naief, M.F., Mohammed, S.N., Mayouf, H.J., & Mohammed, A.M. (2023). A review of the role of carbon nanotubes for cancer treatment based on photothermal and photodynamic therapy techniques. *Journal of Organometallic Chemistry*, 999, 122819. <https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2023.122819>
- Pavlenko, O.L., Brusentsov, V.A., Dmytrenko, O.P., Kulish, M.P., Sendiuk, V.A., Kobzar, P.Y., ... & Prostota, Y.O. (2018). Spectral and quantum-chemical study of interaction between fullerenes and squaraine dyes. *Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies*, 16(1), 31–40. <https://doi.org/10.15407/nnn.16.01.031>
- Villa, I., Villa, C., Crapanzano, R., Secchi, V., Tawfilas, M., Trombetta, E., ... & Monguzzi, A. (2021). Functionalized scintillating nanotubes for simultaneous radio-and photodynamic therapy of cancer. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(11), 12997–13008. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c02504>
- Wang, L., Shi, J., Liu, R., Liu, Y., Zhang, J., Yu, X., ... & Zhang, Z. (2014). Photodynamic effect of functionalized single-walled carbon nanotubes: a potential sensitizer for photodynamic therapy. *Nanoscale*, 6(9), 4642–4651. <https://doi.org/10.1039/C3NR06835H>

Отримано редакцією збірника / Received: 13.08.24

Прорецензовано / Revised: 28.08.24

Схвалено до друку / Accepted: 23.10.24

Vladyslav MAXYMU¹, Student
ORCID ID: 0009-0004-0296-7693
e-mail: vlad.maxymuk@gmail.com

Anton GAPONOV¹, PhD Student
Scopus ID: 57202607757
e-mail: antongaponov@ukr.net

Olena PAVLENKO¹, DSc (Phys. & Math.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0001-8838-4798
e-mail: pavlenko@knu.ua

Oksana DMYTRENKO¹, DSc (Phys. & Math.), Prof.
ORCID ID: 0000-0002-4271-4234
e-mail: o_dmytrenko@knu.ua

Mykola KULISH¹, DSc (Phys. & Math.), Prof.
ORCID ID: 0000-0002-7409-8560
e-mail: mpkulish@knu.ua

¹Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

OPTICAL PROPERTIES OF FILMS OF CARBON NANOSTRUCTURES WITH PHOTSENSITIZING DYES FOR PHOTODYNAMIC THERAPY

Introduction. Carbon nanotubes, due to their unique physical properties, namely, absorption in the IR range and the ability to convert absorbed energy into heat, have great potential for use in photodynamic and photothermal therapy for the treatment of cancer.

Methods. Single-walled carbon nanotubes functionalized with octadecylamine were dissolved in water (0.05 mg/mg) with additional dispersion by ultrasound, and then deposited on substrates. A film of squaraine dye was deposited by vacuum thermal deposition. Optical absorption spectra were measured using a SHIMADZU spectrophotometer. Quantum-chemical calculations of model molecules were performed in the Gaussian 09 software package using semi-empirical methods PM6, ZINDO.

Results. Experimental absorption spectra of nanocomposite films of squaraine dyes with multi-walled carbon nanotubes were studied in comparison with the effects for films of C₆₀ fullerenes. Changes in optical properties are explained taking into account changes in the hybridization of carbon atoms using the example of model π -stacked complexes of C₇₀ fullerenes with squaraine dyes using quantum chemical calculations.

Conclusions. Thus, during the complex formation of squaraine dye with carbon nanostructures with different degrees of carbon atom hybridization, the electronic structure of the complexes undergoes transformation. This is accompanied by changes in the electronic band gap and, accordingly, may manifest as shifts in absorption peaks, influencing the potential application of the dyes as photosensitizers in photodynamic therapy.

Keywords: multi-walled carbon nanotubes, fullerenes, photosensitizers.

Автори В. Максимук, А. Гапонов, О. Павленко, О. Дмитренко та М. Куліш, заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors V. Maxymuk, A. Gaponov, O. Pavlenko, O. Dmytrenko and M. Kulish, declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

Олександр ШАЙКО-ШАЙКОВСЬКИЙ¹, д-р техн. наук, проф.

ORCID ID: 0000-0002-0818-5367

e-mail: o.Shaiko-shaikovskiy@chnu.edu.ua

Олексій ДУДКО², канд. мед. наук, доц.

ORCID ID: 0000-0003-1848-5053

e-mail: Dudko.oleksii@bsmu.edu.ua

Валерій КРИВОНОСОВ³, д-р техн. наук, проф.

ORCID ID: 0000-0002-8219-021X

e-mail: yhtverf007@ukr.net

Дмитро ЯКИМ'ЮК⁴, канд. мед. наук

e-mail: traumalshmd@gmail.com

¹Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Чернівці, Україна

²Буковинський державний медичний університет, Чернівці, Україна

³Київський національний університет біоресурсів

та природокористування України, Київ, Україна

⁴ОКНП "Чернівецька лікарня швидкої медичної допомоги", Чернівці, Україна

БІОМЕХАНІЧНІ АСПЕКТИ НАКІСТКОВОГО ОСТЕОСИНТЕЗУ ДІАФІЗАРНИХ ПЕРЕЛОМІВ

Вступ. Розглянуто деякі біомеханічні аспекти остеосинтезу діафізарних переломів (поперечних, косих, гвинтоподібних) за допомогою накісткових пластин. Наявність великої кількості типів і різновидів накісткових пластин, які досить дешеві порівняно з іншими видами фіксуючих конструкцій (інтрамедулярними, черезкістковими тощо), робить такий вид фіксації відламків пошкодженої кістки досить ефективним, важливим та дешевим. Метою дослідження було розробити методику визначення варіантів раціонального розташування фіксуючих та блокуючих гвинтів на корпусі накісткового фіксатора під впливом на нього комплексу простих та складних видів навантажень.

Методи. Застосовано програмне середовище Solid Works для створення моделі "кістка – накістковий фіксатор", а напружено-деформований стан під час статичних навантажень визначався в програмі Autodesk. Модель передбачала розташування на корпусі різної кількості отворів по 2, 3 та 4 гвинти від лінії зламу. Розрахунки проводилися для матеріалу сталь 12X18H9T.

Результати. У проведеному комп'ютерному моделюванні було визначено стресові напруження за фон Мізесом у 4-х точках накісткової пластини: 1 – по центру пластини, 2 – біля найближчого до центра отвору, 3 – по центру відстані між цим отвором та краєм пластини, 4 – між 1 і 2 від центра пластини отворами. Під час фіксації по 4 гвинти з кожного боку перелому за максимального навантаження рівень напружень по центру пластини становив – 101,194 МПа, біля найближчого до центра отвору – 96,456 МПа, а в 3 і 4 точках – по 107,779 МПа та 154,177 МПа, відповідно. Під час фіксації меншою кількістю гвинтів, за рахунок збільшення стресової зони, у більшості точок вимірювання напруження знижувалося, зокрема при фіксації по 3 гвинти поблизу найближчого до центра пластини отвору напруження знижувалося на 10,7 %, а в 4-й точці зменшувалося на 2,3 %, за рахунок близькості розташування фіксуючого гвинта.

© Шайко-Шайковський Олександр, Дудко Олексій,
Кривонос Валерій, Яким'юк Дмитро, 2024

Висновки. *Практика свідчить, що використання сучасних накісткових малоконтактних конструкцій дозволяє суттєво прискорити терміни зростання відламків кісток, а розроблена авторами методика визначення найбільш раціонального розташування фіксуєчих елементів на корпусі пластини дозволяє істотно зменшити інвазивність та кількість концентраторів напружень на самій кістці.*

Ключові слова: *діафізарні переломи, остеосинтез, накісткові пластини, стабільність фіксації.*

Вступ

Пошкодження і травми кісток опорно-рухового апарату людини – досить поширені причини втрати працездатності, інвалідності, а в окремих, найбільш важких випадках – летальних результатів. За даними ООН у світі дорожньо-транспортні пригоди (ДТП) є третьою за частотою причиною смертності серед молоді та працездатного населення. Щорічно у світі внаслідок ДТП гинуть 10 млн людей, 50 млн травмуються або стають каліками (Aloudah et al., 2020; Goniewicz et al., 2016, pp. 433–438). В Україні спостерігається аналогічна тенденція і за офіційною статистикою щоденно в мирний час отримують травми 120 людей унаслідок нещасних випадків та побутових травм, 30 із них – лишаються інвалідами, 3–5 гинуть. Матеріальні збитки суспільства внаслідок загибелі та травматизму людей становить близько 2,2 млрд дол. США на рік (Ekegren et al., 2018). Сьогодні, у військовий час, ця статистика істотно зростає.

Мета дослідження розробити методику визначення варіантів раціонального розташування фіксуєчих та блокуєчих гвинтів на корпусі накісткового фіксатора під впливом на нього комплексу простих та складних видів навантажень.

Методи

За допомогою програми Solid Works (Dassault Systèmes SolidWorks Corp., Waltham, Massachusetts, U.S.) було створено модель "кістка – накістковий фіксатор". Далі за допомогою методу кінцевих елементів проведено моделювання напружено-деформованого стану матеріалу пластин для остеосинтезу (сталь 12X18H9T) у програмі Autodesk Fusion (Autodesk Inc., San Francisco, California, U.S.). Під час розташування на їхньому корпусі різної кількості отворів по 2, 3 та 4 гвинти від лінії зламу (тобто розташуванні на різних відстанях між центрами отворів) у процесі моделювання кістки було модельовано поперечний перелом, а трубчаста кістка представлена у вигляді двох окремих фрагментів з товщиною кортикального шару 5 мм та зовнішнім діаметром 40 мм, що відповідає параметрам стегнової кістки в середній третині. Модель містила 36718 пірамідальних елементів із середнім розміром 3,16 мм та мінімальним розміром 0,3 мм у ділянках отворів гвинтів.

Результати

Лікування пошкоджень і переломів кістки опорно-рухового апарату стало не тільки медичною проблемою, це також важливі й актуальні соціальні, економічні задачі, які постають перед суспільством (Eckart, Ghimire, & Stavitz, 2024, p. 123). Їх вирішення неможливе без комплексних, спільних зусиль

науковців і фахівців як медичного, так і інженерно-технічного профілю (матеріалознавців, спеціалістів у галузі біомеханіки, міцності, технологій). На думку більшості спеціалістів-травматологів, найбільш ефективними на сьогодні вважаються оперативні методи лікування. При консервативних методах лікування (гіпсова пов'язка) інвалідність виникає в 8–30 % випадках, у той час як при оперативних шляхах цей показник знижується до 5–20 % (Романенко та ін., 2010, с. 68–75). У проведеному нами комп'ютерному моделюванні було визначено стресові напруження за фон Мізесом у 4-х точках накісткової пластини: 1 – по центру пластини, 2 – біля найближчого до центра отвору, 3 – по центру відстані між цим отвором та краєм пластини, 4 – між 1 і 2 від центра пластини отворами. При цьому моделювалася різна кількість і розташуванні гвинтів, що дозволили визначити найбільш оптимальні ділянки їх введення.

Найбільші стресові напруження виявлялися у варіантах з найбільшою кількістю введення гвинтів – по 4 гвинти від лінії перелому, а найменші – при введенні по 2 гвинти від лінії перелому в отвори, максимально віддалені від центра пластини. Втім слід зазначити, що для останнього збільшувалися зміщення ділянки пластини над переломом, отже стабільність фіксації погіршувалася. Діапазон навантажень становив від 100 Н до 2000 Н, сила прикладалася до дистального відділу пластини під кутом 90° до поздовжньої осі пластини. При фіксації по 4 гвинти з кожного боку перелому за максимального навантаження рівень напружень по центру пластини становив – 101,194 МПа, біля найближчого до центра отвору – 96,456 МПа, а в 3 і 4 точках – по 107,779 МПа та 154,177 МПа, відповідно. За менших навантажень стресові показники були нижчими, але тенденція зберігалася (рис. 1). При фіксації меншою кількістю гвинтів, за рахунок збільшення стресової зони, в більшості точок вимірювання напруження знижувалося, зокрема при фіксації по 3 гвинти найбільш віддалено від лінії зламу поблизу найближчого до центра пластини отвору напруження знижувалося на 10,7 %, а в 4-й точці зменшувалося тільки на 2,3 %, за рахунок близькості розташування гвинта.

Розроблена методика дозволяє подібним шляхом визначати мінімальну відстань між отворами для корпусів пластин будь-яких розмірів, забезпечуючи їхню міцність і надійність роботи у складі біотехнічної системи "відламки кістки – накістковий фіксатор". Розрахунки здійснено для найбільш поширених типорозмірів накісткових фіксаторів, зокрема і пластини з мінімальним контактом, які знайшли широке застосування в медичній практиці. Особливо важливим є питання про оптимальне розташування фіксуючих гвинтів для створення стабільного остеосинтезу. Математичне комп'ютерне моделювання можливих варіантів кріплення за різної кількості та розташуванні гвинтів дозволили визначити напруження, деформації, переміщення та запас міцності матеріалу конструкції накісткового фіксатора, які при цьому виникають.

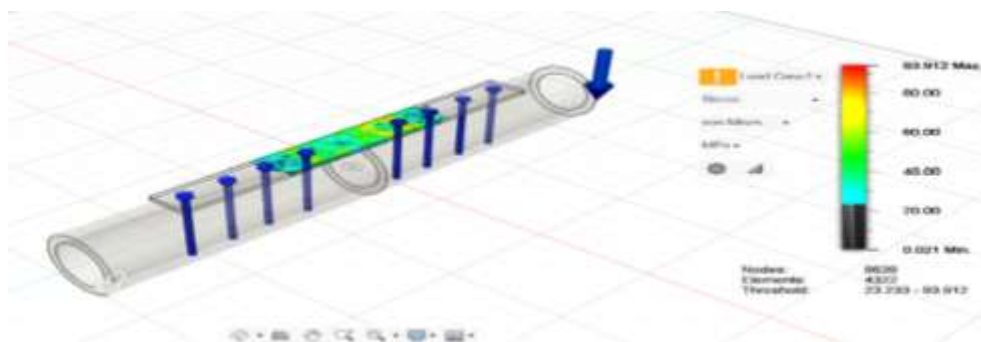


Рис. 1. Напружено-деформований стан у накістковій пластині під дією навантаження 1000 Н, вектор прикладеного навантаження, варіант фіксації по 4 гвинти в кожному фрагменті перелому

На вибір кількості гвинтів для фіксації та блокування впливає зокрема вид і тип перелому, тому кінцеве рішення, щодо створення того чи іншого виду остеосинтезу приймає лікар-травматолог, так само, як і визначення кількості гвинтів для остеосинтезу. Сучасні методи та технології лікування переломів і пошкоджень кісток досить різноманітні. Це обумовлюється широким асортиментом видів і типів переломів (діафізарні, проксимальні, дистальні, поперечні, косі, гвинтові, осколкові, багатоосколкові, розтрошені, детензійні тощо). Кожний із цих типів переломів вимагає своєї, індивідуальної технології лікування, свого підходу, відповідних технічних засобів.

Досить важливою властивістю, притаманною сучасним видам остеосинтезу, є його біологічність: тобто поведінка створюваної біотехнічної системи "відламки кістки – фіксатор" має найбільш точно моделювати властивості непошкодженої кістки. У таких випадках виключається поява так званого ефекту шунтування, за якого синтезована ділянка кістки виключається з навантаження, що, у свою чергу, викликає вимивання кальцію з кортикальної кісткової речовини, змінення фізико-механічних властивостей так званої стресової ділянки кістки поблизу місця перелому. Унаслідок цього часто трапляються повторні переломи тієї ж самої ділянки кістки після зрощення перелому та вилучення фіксуючої конструкції. Саме тому важлива оптимізація накісткового остеосинтезу. Це дозволить вибирати коректний тип фіксації для кожного перелому – біологічний чи компресійний варіант, що відповідно буде впливати на утворення первинного та вторинного кісткового мозоля, а здатність до деформації усієї біотехнічної системи повинна імітувати відповідні деформації стискання, згинання, кручення (Field, & Törnkvist, 2001, pp. 169–178). Успішне розв'язання такої задачі можливе лише завдяки спільним зусиллям медиків-травматологів, спеціалістів у галузі опору матеріалів, матеріалознавства, будівельної механіки, моделювання, біомеханіки, що дозволить оптимально й індивідуально застосовувати цей простий, поширений і доступний на сьогодні вид остеосинтезу, зважаючи на різноманіття пластин (Tu et al., 2022).

Для забезпечення ефективного зрощення кісткових фрагментів необхідне вільне, безперешкодне постачання біологічних рідин до місця перелому, створення певної дозованої компресії між відламками, уникання виникнення ефекту "шунтування". Із цією метою набули поширення так звані малоконтактні накісткові конструкції (van Nguyen et al., 2021). Такі фіксатори мінімально контактують з періостом, майже його не пошкоджуючи, забезпечують хороше кровопостачання до зони перелому, а також мають досить невелику масу. Полегшення конструкцій позитивно впливає на перебіг зрощення, створює більш комфортні умови для постраждалого. Проте полегшення конструкції, зменшення її матеріалоемності негативно впливає на її міцність та жорсткість. Тому досі залишається не вирішеним питання про мінімально допустимі розміри поперечного перерізу накісткового фіксатора, а також про мінімально допустимі відстані між отворами на корпусі фіксатора, які знижують його міцність і є своєрідними концентраторами напружень, що також істотно знижує його розрахункову міцність. Отримані розрахунковим шляхом результати повністю підтверджуються даними практичної медичної оперативної діяльності під час проведення накісткового остеосинтезу (Шайко-Шайковський та ін., 2014, с. 26–30).

Дискусія і висновки

Аналіз сукупності отриманих результатів проведених досліджень дозволяє зробити практичні рекомендації лікарям-травматологам для подальшого використання в медичній практиці.

1. Запропоновано методику комп'ютерного моделювання для оцінювання параметрів напружено-деформованого стану матеріалу накісткових фіксаторів за різної кількості та розташуванні отворів для фіксуєчих елементів, визначено мінімально допустиму відстань між отворами за різних розмірів поперечного перерізу накісткових пластин.

2. Розроблено та запропоновано методику комп'ютерного моделювання для визначення оптимального розташування фіксуєчих та блокуєчих елементів на корпусі накісткового фіксатора за різних видів простих і складних навантажень з найвищими стресовими навантаженнями до 154,177 МПа, що нижче максимальних параметрів руйнування нержавіючої сталі медичного призначення.

3. Результати проведеного математичного моделювання дозволяють виділити найбільш раціональні та найменш вдачі варіанти розташування фіксуєчих елементів за заздалегідь заданих їх кількості, що знайшло практичне застосування під час медичної оперативної діяльності в лікуванні переломів.

Внесок авторів: ідеї, формулювання або еволюція всеохопних цілей і завдань дослідження надавались усіма авторами в процесі обговорення, планування роботи та дослідження в цілому. Олександр Шайко-Шайковський та Валерій Кривоносов – формальний аналіз та застосування статистичних, математичних, обчислювальних та інших методів для аналізу або синтезу емпіричних даних дослідження; Олексій Дудко та Дмитро Яким'юк, лікарі-практики – активна участь у наприкінцевому аналізі отриманих результатів; Олександр Шайко-Шайковський та Валерій Кривоносов – програмне забезпечення, проєктування та використання комп'ютерних

програм пакета Solid Works; Олексій Дудко та Дмитро Яким'юк – методологія та розробка методології, створення моделей дослідження; Олександр Шайко-Шайковський – написання оригінальної (початкового варіанта) чернетки; Олексій Дудко – написання та перегляд-редагування, внесення суттєвих змін до рукопису.

Валідація даних, перевірка відтворюваності результатів проводилися в клінічних умовах ОКНП "Чернівецька лікарня швидкої допомоги" і лабораторіях Чернівецького національного університету ім. Ю. Федьковича та Національного університету біоресурсів та природокористування України.

Подяки, джерела фінансування. Автори висловлюють щирю подяку всім, хто брав участь у підготовці цієї публікації, виготовляв та надавав накісткові пластини, (мале підприємство ВАМП), брав участь у вимірюваннях в лабораторії опору матеріалів ЧНУ ім. Ю. Федьковича, а також здійснював комп'ютерне моделювання та розрахунки щодо оцінювання параметрів напружено-деформованого стану накісткових пластин в умовах простих та складних видів деформацій.

Список використаних джерел

Романенко, К.К., Белостоцкий, А.И., Прозоровский, Д.В., & Голка, Г.Г. (2010). Функции и виды пластин и винтов в современном остеосинтезе. *Ортопедия, травматология и протезирование*, 1, 68–75.

Шайко-Шайковський, А.Г., Белов, М.Е., Олексюк, І.С. та ін. (2014). Методика комп'ютерної оптимізації розміщення фіксуючих елементів на корпусі накісткової пластини при ротационних впливах. *Ортопедия, травматология и протезирование*, 4, 26–30. <https://doi.org/10.15674/0030-59872014426-30>

Aloudah, A.A., Almesned, F.A., Alkanan, A.A., & Alharbi, T. (2020). Pattern of Fractures Among Road Traffic Accident Victims Requiring Hospitalization: Single-institution Experience in Saudi Arabia. *Cureus*, 12(1), e6550. <https://doi.org/10.7759/cureus.6550>

Eckart, A.C., Ghimire, P.S., & Stavitz, J. (2024). Predictive validity of multifactorial injury risk models and associated clinical measures in the U.S. population. *Sports (Basel)*, 12(5), 123. <https://doi.org/10.3390/sports12050123>

Ekegren, C.L., Edwards, E.R., de Steiger, R., & Gabbe, B.J. (2018). Incidence, costs and predictors of non-union, delayed union and mal-union following long bone fracture. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 15(12), 2845. <https://doi.org/10.3390/ijerph15122845>

Field, J.R., & Törnkvist, H. (2001). Biological fracture fixation: a perspective. *Vet. Comp. Orthop. Traumatol.*, 14(04), 169–178. <https://doi.org/10.1055/s-0038-1632694>

Goniewicz, K., Goniewicz, M., Pawłowski, W., & Fiedor, P. (2016). Road accident rates: strategies and programmes for improving road traffic safety. *Eur. J. Trauma. Emerg. Surg.*, 42(4), 433–438. <https://doi.org/10.1007/s00068-015-0544-6>

Tu, J., Jiang, H., Li, C., Huang, X., & Li, X. (2022). Clinical Outcomes of Treatment Strategies for Postoperative Plate Fracture and In Situ Fracture of the Femoral Shaft. *BioMed Research International*, 8145438. <https://doi.org/10.1155/2022/8145438>

Van Nguyen, L., Nguyen, G.N., Nguyen, B.L., & Bui, H.M. (2021). Results and complications of minimally invasive medial plate osteosynthesis for distal metaphyseal tibial fractures: A prospective case series from Vietnam. *Annals of Medicine and Surgery*, 70, 102886. <https://doi.org/10.1016/j.amsu.2021.102886>

References

Aloudah, A.A., Almesned, F.A., Alkanan, A.A., & Alharbi, T. (2020). Pattern of Fractures Among Road Traffic Accident Victims Requiring Hospitalization: Single-institution Experience in Saudi Arabia. *Cureus*, 12(1), e6550. <https://doi.org/10.7759/cureus.6550>

Eckart, A.C., Ghimire, P.S., & Stavitz, J. (2024). Predictive validity of multifactorial injury risk models and associated clinical measures in the U.S. population. *Sports (Basel)*, 12(5), 123. <https://doi.org/10.3390/sports12050123>

Ekegren, C.L., Edwards, E.R., de Steiger, R., & Gabbe, B.J. (2018). Incidence, costs and predictors of non-union, delayed union and mal-union following long bone fracture. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 15(12), 2845. <https://doi.org/10.3390/ijerph15122845>

Field, J.R., & Törnkvist, H. (2001). Biological fracture fixation: a perspective. *Vet. Comp. Orthop. Traumatol.*, 14(04), 169–178. <https://doi.org/10.1055/s-0038-1632694>

Goniewicz, K., Goniewicz, M., Pawłowski, W., & Fiedor, P. (2016). Road accident rates: strategies and programmes for improving road traffic safety. *Eur. J. Trauma. Emerg. Surg.*, 42(4), 433–438. <https://doi.org/10.1007/s00068-015-0544-6>

Romanenko, K.K., Bilostotskyi, A.I., Prozorovsky, D.V., & Holka, H.H. (2010). Functions and types of plates and screws in modern osteosynthesis. *Orthopaedics, traumatology and prosthetics*, 1, 68–75 [in Russian].

Shajko-Shajkovskij, A.G., Belov, M.E., Oleksjuk, I.S. et al. (2014). Method of the computer optimization of fixing elements placing on the hull of the plate under rotational effects. *Orthopaedics, traumatology and prosthetics*, 4, 26–30 [in Russian]. <http://doi.org/10.15674/0030-59872014426-30>

Tu, J., Jiang, H., Li, C., Huang, X., & Li, X. (2022). Clinical Outcomes of Treatment Strategies for Postoperative Plate Fracture and In Situ Fracture of the Femoral Shaft. *BioMed Research International*, 8145438. <https://doi.org/10.1155/2022/8145438>

Van Nguyen, L., Nguyen, G.N., Nguyen, B.L., & Bui, H.M. (2021). Results and complications of minimally invasive medial plate osteosynthesis for distal metaphyseal tibial fractures: A prospective case series from Vietnam. *Annals of Medicine and Surgery*, 70, 102886. <https://doi.org/10.1016/j.amsu.2021.102886>

Отримано редакцією збірника / Received: 29.06.24

Прорецензовано / Revised: 31.07.24

Схвалено до друку / Accepted: 01.10.24

Alexander SHAIKO-SHAIKOVSKIY¹, DSc (Engin.), Prof.

ORCID ID: 0000-0002-0818-5367

e-mail: o.Shaiko-shaikovskiy@chnu.edu.ua

Oleksii DUDKO², PhD (Med.), Assoc. Prof.

ORCID ID: 0000-0003-1848-5053

e-mail: Dudko.oleksii@bsmu.edu.ua

Valerii KRYVONOSOV³, DSc (Engin.), Prof.

ORCID ID: 0000-0002-8219-021X

e-mail: yhtverf007@ukr.net

Dmitro YAKIMYUK⁴, PhD (Med.)

e-mail: traumalshmd@gmail.com

¹Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine

²Bukovinian State Medical University, Chernivtsi, Ukraine

³National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

⁴Emergency Hospital of Chernivtsi City, Chernivtsi, Ukraine

BIOMECHANICAL ASPECTS OF BONE PLATE OSTEOSYNTHESIS FOR DIAPHYSEAL FRACTURES

Introduction. *The paper presents some biomechanical aspects of osteosynthesis diaphyseal fractures (transverse, oblique, and spiral) by means of bone plates. The presence of large amount of different types of bone plates makes this type of internal fracture fixation very effective, inexpensive and worthy for further research and development. The aim of research was to develop the technology of calculating the optimal variants of screw placement in the plate under various simple and complicated loads.*

Methods. *For this purpose the plate-bone model was created in Solid Works and the strain-deformity state under static load was calculated in Autodesk. The following variants of fixation were studied: with 2, 3, 4 screws on each side of a fracture. Stainless steel 12X18H9T parameters were used in the study.*

Results. *The von Misses stress was measured in 4 plate areas. For the variant of fixation when 4 screws were used on each side from the fracture for the maximum load the stress level at the plate center was – 101.194 MPa, near the first hole from the fracture site – 96.456 MPa, in the 3 and the 4 points – 107.779 MPa and 154.177 MPa respectively. In cases with the less number of screws were used the stress was decreased due to the increasing of the plate stress zone. Particularly when 3 screws were used the stress decreased near the 1 hole of the plate on 10.7 %, and in the 4 point it was decreased only on 2.3 %, due to the proximity of the inserted screw.*

Conclusions. *The practical application of use low contact bone plates creates advanced conditions for fracture healing without delays, a the methodology that was developed by the authors to determine the optimal allocation of fixing elements on the plate body allows to perform it less invasive and to decrease the level of stress concentrators on the bone.*

Key words: *diaphyseal fractures, osteosynthesis, bone plates, fixation stability.*

Автори О. Шайко-Шайковський, О. Дудко, В. Кривоносов та Д. Яким'юк заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; є рішенні про публікацію результатів.

The authors A. Shaiko-Shaikovskiy, O. Dudko, V. Kryvonosov and D. Yakimyuk declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

Артур ГУСЛІСТИЙ

Scopus ID: 57204956669

e-mail: aguslisty@gmail.com

Центр сімейної медицини "Амедика", Одеса, Україна

Олексій ХОРОЛЬСЬКИЙ, канд. фіз.-мат. наук, доц.

Scopus: ID 56667613000

e-mail: khorolskiy.alexey@gmail.com

Полтавський національний педагогічний університет
імені В. Г. Короленка, Полтава, Україна

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗАЛЕЖНОСТІ ДЗЕТА-ПОТЕНЦІАЛУ СИРОВАТКОВОГО АЛЬБУМІНУ ЛЮДИНИ ВІД pH ФІЗІОЛОГІЧНОГО РОЗЧИНУ

Вступ. Робота присвячена побудові математичної моделі залежності дзета-потенціалу макромолекули сироваткового альбуміну людини в 0,15 М водному розчині хлориду натрію (фізіологічний розчин) як функції зміни водневого показника pH (кисотно-лужного балансу) водного оточення.

Методи. Проаналізовано асиметричність зазначеної експериментальної залежності відносно ізоелектричної точки альбуміну pH_0 5,1, за якої дзета-потенціал макромолекули дорівнює нулю.

Результати. Запропонована математична модель, яка передбачає розбиття pH діапазону залежності дзета-потенціалу макромолекули сироваткового альбуміну людини у фізіологічному розчині як функції водневого показника pH на дві області: 1) в інтервалі значень $pH < pH_0$ для апроксимації застосована експоненційна функція; 2) в інтервалі значень $pH > pH_0$ експериментальна залежність апроксимована функцією гіперболічного тангенса. У межах похибки експерименту величини дзета-потенціалу, обчислені за допомогою запропонованої математичної моделі, добре корелюють з експериментальними значеннями: середня відносна похибка оцінена менше 5,5 % за $pH < pH_0$ та не перевищила 4,1 % за $pH > pH_0$.

Висновки. Отримані результати можуть бути використані для створення фізичної моделі, яка пов'язувала б просторову структуру та електрофізичні властивості макромолекули альбуміну при зміні водневого показника pH водного оточення.

Ключові слова: математична модель, альбумін, дзета-потенціал, pH, фізіологічний розчин.

Вступ

Виконання транспортної функції сироватковим альбуміном людини передбачає зміну структури протеїну у водному розчині залежно від температури, концентрації, кислотно-основної рівноваги (pH) середовища, наявності солей тощо. При потраплянні альбуміну у водно-сольовий розчин за фізіологічних значень pH відбувається взаємодія молекул води і солей з бічними ділянками амінокислотних залишків макромолекули: а) аспарагінова та глутамінова кислоти стають негативно зарядженими, б) аргінін, лізин і гістидин набувають позитивного заряду. Протилежні заряди утворюються за рахунок втрати або

© Гуслістий Артур, Хорольський Олексій, 2024

приєднання іонів водню від карбоксильних груп ($-\text{COOH}$) та аміногруп ($-\text{NH}_2$) вказаних амінокислот, унаслідок чого відбувається перерозподіл електричних зарядів на поверхні макромолекули та у розчині. Навколо молекули виникає хмара позитивних і негативних зарядів, що шарами замінюють один одного – утворюється подвійний електричний шар, який повністю екранує заряд молекули. Зі зміною показника рН у розчині змінюються і заряди амінокислотних залишків макромолекул, а отже, і загальний заряд макромолекул альбуміну: за кислотних рН загальний заряд позитивний, за основних рН – негативний. Перерозподіл зарядів на поверхні макромолекули приводить до зміни просторової структури макромолекули та сприяє процесам олігомеризації макромолекул альбуміну (Barbosa et al., 2010; Bhattacharya et al., 2014).

Хоча дослідженню структури альбуміну у водних розчинах присвячено значну кількість робіт, проте ефективна модель зв'язку структури та електрофізичних властивостей макромолекули альбуміну зі зміною рН водних розчинів наразі відсутня (Bukackova, Rusnok, & Marsalek, 2018).

Метою роботи є спроба побудови математичної моделі, яка б відтворювала поведінку дзета-потенціалу макромолекул сироваткового альбуміну людини у фізіологічному розчині зі зміною показника рН середовища.

Методи

Експериментальні дані залежності дзета-потенціалу макромолекул сироваткового альбуміну людини від показника рН водних розчинів хлориду натрію взято з роботи (Jachimska, Wasilewska, & Adamczyk, 2008, p. 6870). Автори роботи використали кристалізований і ліофілізований порошок сироваткового альбуміну людини (Sigma, 99 %) без додаткового очищення. Для приготування 0,15 М (0,9 мас. %) водного розчину хлориду натрію (фізіологічний розчин) у діапазоні рН від 2,5 до 10,5 використано двічі дистильовану воду, NaCl, HCl та NaOH (Sigma, Aldrich). Дзета-потенціал макромолекул альбуміну виміряно за допомогою Zetasizer Nano ZS (Malvern Panalytical, Великобританія) за температури $T = (298,0 \pm 0,1)$ К, використовуючи метод лазерної доплерівської велосиметрії (Jachimska, Wasilewska, & Adamczyk, 2008, p. 6867). Відносні похибки вимірювання дзета-потенціалу та показника рН ми оцінили як рівні: $\varepsilon(\zeta) = 5\%$ і $\varepsilon(\text{pH}) = 0,5\%$, відповідно. Для досягнення поставленої мети у роботі застосовані методи математичного моделювання.

Результати

Дзета-потенціал (ζ) як різниця потенціалів водного середовища та нерухомого шару рідини, що оточує макромолекулу, може бути вимірний експериментально і дозволяє зробити висновки про загальний заряд макромолекул у розчині. Однією з особливостей залежності дзета-потенціалу макромолекул сироваткового альбуміну людини у розчині від показника рН середовища є існування характерної точки – ізоелектричної точки альбуміну, у якій дзета-потенціал альбуміну (і загальний заряд макромолекули) дорівнює нулю. Ізоелектричну точку альбуміну за pH_0 5,1 природно взяти реперною точкою (точкою відліку) досліджуваної залежності.

Як видно з рис. 1, характер залежності дзета-потенціалу від рН зазнає змін за pH_0 5,1 і не симетричний відносно ізоелектричної точки. Для наочної демонстрації сказаного візьмемо будь-яке експериментальне значення дзета-потенціалу макромолекули альбуміну на графіку залежності $\zeta = \zeta_{alb}(pH)$: наприклад, $\zeta_A = +29$ мВ за рН 2,7. Прямая, проведена через цю точку $A(+29; 2,7)$ та ізоелектричну точку альбуміну, перетне графік залежності в точці B , де $\zeta_B = -13$ мВ за рН 6,1, тобто бачимо, що

$$\zeta_A(pH_A) \neq -\zeta_B(pH_B). \quad (1)$$

Отже, дійсно характер залежності $\zeta = \zeta_{alb}(pH)$ асиметричний. Визначимо ступінь асиметричності цієї залежності:

$$Asym(\zeta) = (\zeta_A - \zeta_B) / \zeta_A, \quad (2)$$

звідки отримуємо $Asym(\zeta) = 0,55$. Нехай $x = pH - pH_0$, тоді рівняння $\zeta_A(x) \neq -\zeta_B(-x)$ буде описувати асиметричність кривої залежності $\zeta = \zeta_{alb}(pH)$.

Після попереднього аналізу рис. 1 для апроксимації експериментальних результатів залежності $\zeta = \zeta_{alb}(pH)$ з урахуванням χ^2 -критерію були обрані функції вигляду

$$\zeta = \zeta_0(\exp(x) - 1), \quad (3)$$

$$\zeta = \zeta_0 \tanh(x). \quad (4)$$

Результати порівняння розрахованих за формулами (3) і (4) результатів з експериментальними даними представлено на рис. 1. Із рис. 1 видно, що за $pH < pH_0$ експериментальна крива збігається з лінією, побудованою за формулою (3), а за $pH > pH_0$ експериментальні значення краще апроксимуються кривою, яка задається формулою (4).

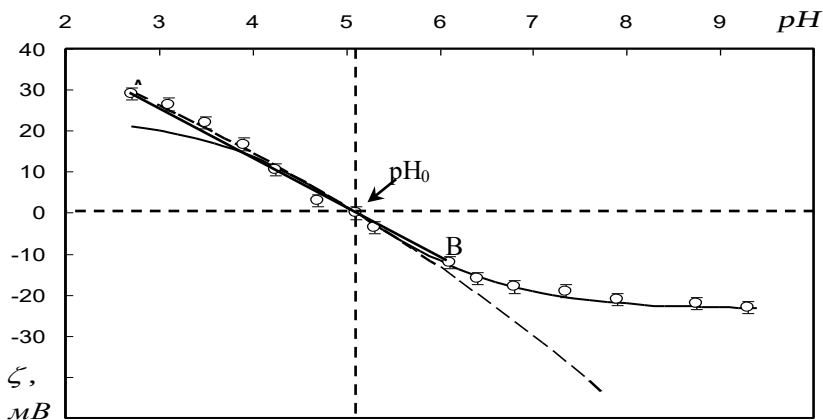


Рис. 1. Залежності дзета-потенціалу макромолекул сироваткового альбуміну людини від показника рН за $T = 298$ К водного розчину хлориду натрію з концентрацією 0,15 М (0,9 мас. %):

білі кружки – експериментальні значення з роботи (Jachimska, Wasilewska, & Adamczyk, 2008, р. 6870); пунктирна лінія – залежність, розрахована за формулою (3); суцільна лінія – залежність, розрахована за формулою (4)

Детальний аналіз залежностей на рис. 1 та порівняння розрахункових значень дзета-потенціалу з експериментальними даними свідчить, що залежність дзета-потенціалу макромолекул сироваткового альбуміну людини у фізіологічному розчині від показника рН розчину можна апроксимувати в межах похибки експерименту функцією

$$\zeta_{alb} = \begin{cases} \zeta_{01} [1 - \exp(\alpha(\text{pH} - \text{pH}_0))], & \text{pH} < \text{pH}_0, \\ \zeta_{02} \tanh(\beta(\text{pH}_0 - \text{pH})), & \text{pH} > \text{pH}_0, \end{cases} \quad (5)$$

де ζ_{01} і ζ_{02} – гіпотетичні значення дзета-потенціалу за $\text{pH} \rightarrow 0$, α і β – емпіричні коефіцієнти, pH_0 5,1. Отримані такі чисельні значення величин: $\zeta_{01} = 118,46$, $\zeta_{02} = 23,53$, $\alpha = 0,119$, $\beta = 0,602$, причому бачимо, що $\zeta_{01} \approx 5\zeta_{02}$ та $\beta \approx 5\alpha$.

Зауважимо, що вигляд функцій (5) обрано таким чином, щоб емпіричні коефіцієнти були додатними. Середня відносна похибка відхилення моделювання від експериментальних значень не перевищила 5,5 % для експоненційного наближення за $\text{pH} < \text{pH}_0$ та 4,1 % для наближення за допомогою функції гіперболічного тангенса за $\text{pH} > \text{pH}_0$.

Дискусія і висновки

У роботі побудовано математичну модель залежності дзета-потенціалу макромолекули сироваткового альбуміну людини у 0,15 М (0,9 мас. %) водному розчині хлориду натрію (фізіологічний розчин) як функції зміни показника рН водного оточення. Аналіз експериментальних даних показав значну асиметричність вказаної залежності відносно ізоелектричної точки альбуміну – значення pH_0 , за якого дзета-потенціал альбуміну дорівнює нулю. Запропонована математична модель, яка апроксимує експериментальну залежність дзета-потенціалу макромолекул альбуміну від рН розчину в діапазоні значень $\text{pH} < \text{pH}_0$ експоненційною функцією, а в діапазоні $\text{pH} > \text{pH}_0$ функцією гіперболічного тангенса. Отримані співвідношення в межах похибки експерименту адекватно відтворюють залежність, отриману експериментальним шляхом: середня відносна похибка відхилення моделювання від експериментальних значень не перевищила 5,5 % за $\text{pH} < \text{pH}_0$ та 4,1 % за $\text{pH} > \text{pH}_0$. Подальші розвідки будуть спрямовані на дослідження застосовності запропонованої моделі для залежностей дзета-потенціалу макромолекул альбуміну як функції температури та концентрації хлориду натрію.

Внесок авторів: Артур Гуслістий – концептуалізація, дослідження, формальний аналіз, валідація даних, написання – оригінальна чернетка; Олексій Хорольський – методологія, дослідження, формальний аналіз, візуалізація, валідація даних, написання – оригінальна чернетка, написання – перегляд і редагування.

Список використаних джерел

Barbosa, L.R.S., Ortore, M.G., Spinozzi, F., Mariani, P., Bernstorff, S., & Itri, R. (2010). The importance of protein-protein interactions on the pH-induced conformational changes of bovine serum

albumin: A small-angle X-ray scattering study. *Biophysical Journal*, 98(1), 147–157. <https://doi.org/10.1016/j.bpj.2009.09.056>

Bhattacharya, A., Prajapati, R., Chatterjee, S., & Mukherjee, T.K. (2014). Concentration-dependent reversible self-oligomerization of serum albumins through intermolecular β -sheet formation. *Langmuir*, 30(49), 14894–14904. <https://doi.org/10.1021/la5034959>

Bukackova, M., Rusnok, P., & Marsalek, R. (2018). Mathematical methods in the calculation of the zeta potential of BSA. *Journal of Solution Chemistry*, 47, 1942–1952. <https://doi.org/10.1007/s10953-018-0830-0>

Jachimska, B., Wasilewska, M., & Adamczyk, Z. (2008). Characterization of globular protein solutions by dynamic light scattering, electrophoretic mobility, and viscosity measurements. *Langmuir*, 24(13), 6866–6872. <https://doi.org/10.1021/la800548p>

References

Barbosa, L.R.S., Ortore, M.G., Spinozzi, F., Mariani, P., Bernstorff, S., & Itri, R. (2010). The importance of protein-protein interactions on the pH-induced conformational changes of bovine serum albumin: A small-angle X-ray scattering study. *Biophysical Journal*, 98(1), 147–157. <https://doi.org/10.1016/j.bpj.2009.09.056>

Bhattacharya, A., Prajapati, R., Chatterjee, S., & Mukherjee, T.K. (2014). Concentration-dependent reversible self-oligomerization of serum albumins through intermolecular β -sheet formation. *Langmuir*, 30(49), 14894–14904. <https://doi.org/10.1021/la5034959>

Bukackova, M., Rusnok, P., & Marsalek, R. (2018). Mathematical methods in the calculation of the zeta potential of BSA. *Journal of Solution Chemistry*, 47, 1942–1952. <https://doi.org/10.1007/s10953-018-0830-0>

Jachimska, B., Wasilewska, M., & Adamczyk, Z. (2008). Characterization of globular protein solutions by dynamic light scattering, electrophoretic mobility, and viscosity measurements. *Langmuir*, 24(13), 6866–6872. <https://doi.org/10.1021/la800548p>

Отримано редакцією збірника / Received: 01.08.24

Прорецензовано / Revised: 22.08.24

Схвалено до друку / Accepted: 23.10.24

Artur GUSLISTY

Scopus ID: 57204956669

e-mail: aguslisty@gmail.com

Family Medicine Center "Amedika" LLC, Odesa, Ukraine

Oleksii KHOROLSKIY, PhD (Phys. & Math.), Assoc. Prof.

Scopus ID: 56667613000

e-mail: khorolskiy.alexey@gmail.com

Poltava V. G. Korolenko National Pedagogical University, Poltava, Ukraine

MATHEMATICAL MODEL OF THE DEPENDENCE OF THE ZETA POTENTIAL OF HUMAN SERUM ALBUMIN ON THE pH OF THE SALINE

Introduction. *The article is devoted to the construction of a mathematical model of zeta potential dependence of the human serum albumin macromolecule of in a 0.15 M aqueous solution of sodium chloride (saline) as a function of the pH change (acid-base balance) of the aqueous environment.*

Methods. *The asymmetry of the specified experimental dependence relative to the isoelectric point of albumin pH_0 5.1, at which the zeta potential of the macromolecule equals zero, was analyzed.*

Results. *A mathematical model is proposed, which provides division of the dependence of the zeta potential of the human serum albumin macromolecule in saline as a pH function into two intervals: 1) in the range of $pH < pH_0$, an exponential function is used*

for approximation; 2) in the range of $pH > pH_0$, the experimental dependence is approximated by the hyperbolic tangent function. Within the experimental error, the zeta potential values calculated using the proposed mathematical model correlate well with the experimental values: the average relative error is estimated to be less than 5.5 % at $pH < pH_0$ and did not exceed 4.1 % at $pH > pH_0$.

Conclusions. *The obtained results can be used to create a physical model that relates the spatial structure and electrophysical properties of the albumin macromolecule when the pH of the solution changes.*

Key words: *mathematical model, human serum albumin, zeta potential, pH, saline.*

Автори А. Гуслістий та О. Хорольський заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors A. Guslisty and O. Khorolskyi declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

Denys SLIUSARENKO, PhD Student

ORCID ID: 0009-0009-1802-5859

e-mail: d.fulhem@gmail.com

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Andrii NETREBA, PhD (Phys. & Math.), Assoc. Prof.

ORCID ID: 0000-0003-1347-3854

e-mail: avn@univ.kiev.ua

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

BRAIN MRI IMAGES ADAPTIVE DENOISING BY APPLYING NEURAL NETWORKS AND RANGE-BASED PARTITIONING

Introduction. *The denoising autoencoder model for enhancing the quality of T_1 -weighted brain magnetic resonance imaging (MRI) images are considered.*

Methods. *This model utilized deep learning methods and incorporated additional components to improve performance and maintain structural integrity. The key elements included convolutional layers for feature extraction, batch normalization for stability, dropout for regularization, and a unique gradient constraint layer to preserve gradient smoothness.*

Results. *A specialized activation function classified pixel values based on predefined ranges, ensuring the model's adaptation to varying intensity levels in MRI data. The architecture consisted of an encoder-decoder structure with multiple steps of downsampling and concatenation, facilitating the reconstruction of high-quality images. The combination of these elements resulted in a robust model capable of reducing noise levels while preserving important anatomical details.*

Conclusions. *The implementation of this autoencoder model enhanced the clarity and diagnostic value of MRI scans, providing radiologists with improved tools for accurate assessment. The study was conducted using a comprehensive dataset of T_1 -weighted brain MRI images.*

Keywords: *autoencoder, denoising, MRI Brain Images, deep learning, convolutional neural network, gradient constraint, image reconstruction, medical imaging, DICOM.*

Introduction

Medical imaging, particularly magnetic resonance imaging, holds significant importance in medical diagnostics and treatment. However, these images often contain noise or certain artifacts that can obscure fine details or introduce extraneous features, affecting diagnostic accuracy (Aja-Fernández, & Vegas Sánchez-Ferrero, 2016). Therefore, noise reduction methods are currently a relevant topic for enhancing the quality of MRI images, enabling more precise and reliable clinical assessments.

This research focuses on developing an advanced denoising autoencoder model specifically designed for T_1 -weighted brain MRI images. The proposed model employs deep learning methodologies, particularly convolutional neural networks (CNNs), to effectively reduce noise while preserving essential anatomical features (Thakur et al., 2023). This approach integrates several innovations, with the primary one being gradient constraint levels, to ensure optimal performance. By distributing

© Denys Sliusarenko, Netreba Andrii, 2024

pixel values across specific ranges, the model adapts to varying intensity levels of MRI data, offering an improved and adaptive noise reduction process.

Методи

Dataset. The dataset used in this study includes T₁-weighted brain MRI images obtained from publicly available databases and anonymized clinical data sets. Each image in the dataset adheres to standard MRI protocols, ensuring consistency in terms of resolution, contrast, and anatomical coverage. The images are preprocessed to normalize intensity values.

Model architecture. At the core of the developed noise reduction system with an autoencoder model, developed with a encoder-decoder architecture as in most similar neural networks of noise reduction (Sliusarenko, Netreba, & Radchenko, 2023). The encoder extracts essential features from the noisy input images, while the decoder reconstructs the noise-free images. The model incorporates several advanced layers and techniques:

- **Convolutional Layers:** These layers apply convolutional filters to capture spatial features at various scales. The filters are trained to identify noise patterns and corresponding anatomical details.
- **Batch Normalization:** This technique normalizes the outputs of each convolutional layer, ensuring stable and efficient training by mitigating issues related to internal covariate shifts.
- **Dropout Layers:** Dropout regularization is used to prevent overfitting by randomly disabling a fraction of neurons during training, promoting model generalization.
- **Gradient Constraint Layer:** A unique addition to the model, this layer computes image gradients and enforces constraints to preserve smooth transitions and edges.

The gradient layer, as well as the method of dividing images at the network input, are new approaches to physical awareness, which have already begun to show themselves well in denoising tasks (Ghalambaz et al., 2024).

Evaluation metrics. The denoising performance is evaluated using several quantitative metrics:

- **Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR):** Measures the ratio between the maximum possible power of a signal and the power of corrupting noise, indicating the quality of the denoised image.
- **Structural Similarity Index (SSIM):** Assesses the similarity between the denoised image and the ground truth image in terms of luminance, contrast, and structure.
- **Pearson Correlation Coefficient:** Measures the linear correlation between the denoised image and the ground truth image.
- These metrics provide a comprehensive evaluation of the model's ability to reduce noise while preserving crucial anatomical details.

Results

Physics. Magnetic Resonance Imaging (MRI) utilizes powerful magnetic fields, radiofrequency (RF) pulses, and gradient fields to create detailed images of internal body

structures, including the brain (Cleary, & Guimarães, 2014). The fundamental principle is that hydrogen nuclei (protons) in body tissues, excited by the magnetic field and RF pulses, return to their equilibrium state, emitting an RF signal that is detected.

The patient is positioned within a magnetic field generated by a large magnet. This field aligns the hydrogen protons along the direction of the field.

Protons are excited using an RF pulse whose frequency corresponds to the Larmor frequency of the protons. This pulse causes the magnetic moments of the protons to tilt away from the main field.

After the RF pulse is turned off, the protons return to their equilibrium state, releasing energy in the form of RF signals. This process is known as relaxation and consists of two components: T_1 relaxation (longitudinal) and T_2 relaxation (transverse).

T_1 -weighted images are obtained by measuring the signal during T_1 relaxation. Tissues with short T_1 times (e.g., fat) recover their longitudinal magnetization more quickly than tissues with long T_1 times (e.g., water). As a result, tissues with short T_1 appear brighter on the image, while tissues with long T_1 appear darker.

Distinguishing different tissues on MRI images is based on differences in T_1 and T_2 relaxation times and proton density. When choosing scan parameters such as repetition time (TR) and echo sequence time (TE), you can focus on different tissue types.

Short TR and short TE produce T_1 -weighted images where the white matter is bright, and the CSF is dark.

The neural network layer formulas consider the physics of MRI, extracting and preserving important features corresponding to different brain tissues, normalizing data for learning stability, and imposing physical constraints on gradients to preserve signal properties. This provides efficient model training for denoising T_1 -weighted MRI images.

We split the input images into pixel intensity ranges, and the network works with each range separately and assembles the output image.

Certain key elements of the network can be identified.

Input image X is normalized to the range $[0, 1]$.

Convolutional layers perform the convolution operation, which is determined by the following formula:

$$Y_{i,j,k} = \sum_{m,n} W_{m,n,k} X_{i+m,j+n} + b_k.$$

Convolutional layers are used to extract image features that can correspond to physical properties of brain tissue, such as contrast and texture, and they extract spatial features that may correspond to the structure and texture of different brain tissues displayed in T_1 images.

The normalization layer performs the following operation:

$$\hat{X} = \frac{X - \mu}{\sqrt{\sigma^2 + \epsilon}}.$$

These layers consider the statistical properties of the data, which helps to stabilize the learning process, reducing the impact of variations in the data.

The gradient constraint layer imposes constraints on the gradients to account for the physical properties of the MRI signal:

$$Loss = \sum \left(\frac{\delta Y}{\delta X} \right)^2.$$

This imposes physical constraints on the gradients, ensuring that the physical properties of the MRI signal are considered when training the model.

At the end, decoding layers are used, which use reverse convolution and pooling operations with the aim of restoring the image to the original dimension

$$Y_{i,j,k} = \sum_{m,n} W'_{m,n,k} X'_{i+m,j+n} + b'_k,$$

Evaluation metrics results. During training we used different levels of superimposed noise consisting of Gaussian and salt and pepper noise. A value of 5 % randomly damaged pixels with salt and percolation noise and a uniform Gaussian noise damage starting at 5 % and ending at 50 % are used throughout. To qualitatively evaluate image recovery, we have traditionally focused on PSNR and SSIM metrics (Mason et al., 2020). PSNR provides information about the overall image quality by measuring the average difference between the original and reconstructed image. PSNR provides information about the overall image quality by measuring the average difference between the original and reconstructed image.

SSIM. SSIM measures the structural similarity between two images (Mudeng, Kim, & Choe, 2022). This metric is because the human eye is more sensitive to changes in image structure than to changes in signal energy.

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)}.$$

SSIM values range from -1 to 1, where 1 indicates perfect structural similarity, 0 indicates no similarity, and negative values indicate anticorrelation. SSIM considers three main components: luminance, contrast and structure, which makes this metric more complex and accurate compared to simple methods such as PSNR.

Figure 1 shows the change in the structural similarity index value with increasing noise level.

We can see that with an increase in the noise level, the value of SSIM decreases, however, evenly and gradually. At a relatively low level of noise (0–10 %), SSIM remains high (over 95 %), which means a high structural similarity between the original and the noisy image. At a very high level of noise (around 50 %), the SSIM drops to around 82 %, indicating a not very significant degradation of structural similarity even at this high level of noise.

PSNR. PSNR is used to measure the quality of image reconstruction. This is the ratio of the maximum possible signal power to the noise power, which affects the quality of its recovery.

$$PSNR = 20 \log_{10} \left(\frac{MAX_I}{\sqrt{MSE}} \right),$$

where MSE (Mean Squared Error) is calculated as follows:

$$MSE = \frac{1}{mn} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [I(i, j) - K(i, j)]^2 .$$

PSNR is measured in decibels (dB). A higher PSNR value indicates a higher recovery quality, as it means a lower root mean square error.

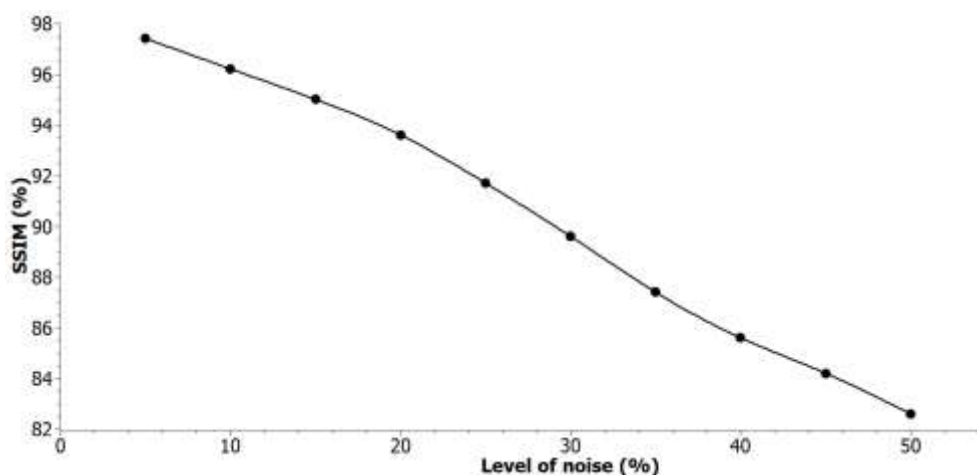


Fig. 1. Structural Similarity Index Measure Dependence of noise level

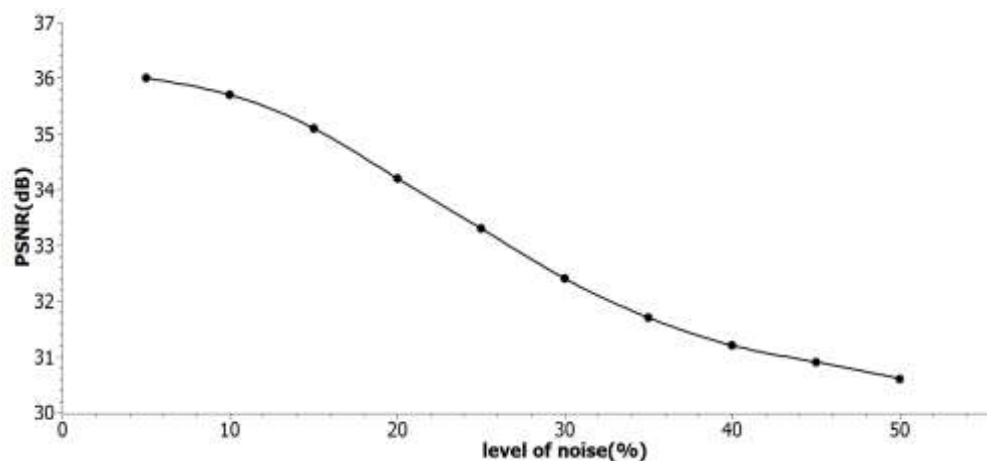


Fig. 2. Peak Signal-to Noise Ratio Dependence on noise level

The fig. 2, like the previous one, shows that as the noise level increases, the PSNR value decreases. At a low noise level (0–10 %), the PSNR remains high (over 35 dB), which confirms the previous quality assessment and at high noise levels, the PSNR drops to about 30 dB, which is still not a significant degradation, but no longer acceptable.

Pearson correlation. The Pearson Correlation Coefficient measures the linear relationship between two variables (Ding et al., 2022). Its values vary from –1 to 1, where

1 means a complete positive linear relationship (when one variable increases, the other also increases), -1 means a complete negative linear relationship (when one variable increases, the other decreases), 0 means no linear relationship between variables

The formula for calculating the Pearson correlation coefficient:

$$r = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{[n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2][n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}}$$

We can consider that the reconstructed image matches the original very well if there is a high correlation with values higher than 0.9. Additionally evaluating the restoration of images with a lot of noise, we obtained a Pearson correlation value higher than 99, which indicates a high linear correlation.

Discussion and conclusions

Developed a denoising autoencoder model to improve the quality of T₁-weighted brain MRI images. A deep learning model based on a classic autoencoder was used. The model was refined with additional layers for a more detailed restoration. A new approach is presented that combines several innovations, the main one being gradient constraint levels, to ensure optimal performance. By distributing the pixel values in certain ranges, the model adapts to the different intensity levels of the MRI data, offering an improved and adaptive noise reduction process.

Compared to other models that also give good results, our model uses a smaller data set, and other models also use non-classical DICOM images, which is very different from real clinical tasks.

It is shown that the use of this approach showed a high quality of denoising while maintaining good detail and leaving the original values of the gradients that were in the input image. We were able to obtain high recovery rates, as evidenced by SSIM values higher than 90 % for noise levels up to 20 %, and this was confirmed by an additional assessment of the peak signal-to-noise ratio, which also showed high value of about 35 decibels for this noise level. We believe that this model still has potential, but even such results are quite high given the new physics-based approach.

This approach has high potential because it is not based only on statistical features of images and noise, as most of the denoising models that have already been presented do. Our model uses physics as part of the denoising process. As further research, additional physical parameters can be considered, as well as the introduction of greater versatility into the model, to work not only with a certain type of MRI images.

Authors' contribution: Denys Sliusarenko – conceptualization, data curation, software, formal analysis, investigation, validation, visualization, writing – original draft, writing – review & editing; Andrii Netreba – supervision, funding acquisition.

Acknowledgments, sources of funding. This work was supported by the Taras Shevchenko National University of Kyiv research project 22BF052-01.

References

- Aja-Fernández, S., & Vegas Sánchez-Ferrero, G. (2016). *Statistical Analysis of Noise in MRI*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-39934-8>
- Cleary, J.O.S.H., & Guimarães, A.R. (2014). Magnetic Resonance Imaging. In L.M. McManus & R.N. Mitchell (Eds.), *Pathobiology of Human Disease* (pp. 3987–4004). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386456-7.07609-7>
- Ding, K., Ma, K., Wang, S., & Simoncelli, E.P. (2022). Image Quality Assessment: Unifying Structure and Texture Similarity. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 44(5), 2567–2581. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2020.3045810>
- Ghalambaz, M., Sheremet, M.A., Khan, M.A., Raizah, Z., & Shafi, J. (2024). Physics-informed neural networks (P INNs): Application categories, trends and impact. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 34(8), 3131–3165. <https://doi.org/10.1108/HFF-09-2023-0568>
- Mason, A., Rioux, J., Clarke, S.E., Costa, A., Schmidt, M., Keough, V., Huynh, T., & Beyea, S. (2020). Comparison of Objective Image Quality Metrics to Expert Radiologists' Scoring of Diagnostic Quality of MR Images. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 39(4), 1064–1072. <https://doi.org/10.1109/TMI.2019.2930338>
- Mudeng, V., Kim, M., & Choe, S. (2022). Prospects of Structural Similarity Index for Medical Image Analysis. *Applied Sciences*, 12(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/app12083754>
- Sliusarenko, D., Netreba, A., & Radchenko, S. (2023). MRI Denoising Neural Network Architecture Convolution. *2023 IEEE 12th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)* (1, pp. 968–971). IEEE Explore. <https://doi.org/10.1109/IDAACS58523.2023.10348629>
- Thakur, R.S., Chatterjee, S., Yadav, R.N., & Gupta, L. (2023). Chapter 5—Medical image denoising using convolutional neural networks. In S.S. Rajput, N.U. Khan, A.K. Singh, & K.V. Arya (Eds.), *Digital Image Enhancement and Reconstruction* (pp. 115–138). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-32-398370-9.00012-3>

Отримано редакцією збірника / Received: 06.09.24

Прорецензовано / Revised: 20.09.24

Схвалено до друку / Accepted: 23.10.24

Денис СЛЮСАРЕНКО, асп.

ORCID ID: 0009-0009-1802-5859

e-mail: d.fulhem@gmail.com

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Андрій НЕТРЕБА, канд. фіз.-мат. наук, доц.

ORCID ID: 0000-0003-1347-3854

e-mail: avn@univ.kiev.ua

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

АДАПТИВНЕ ЗНЕШУМЛЕННЯ МРТ-ЗОБРАЖЕНЬ МОЗКУ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ТА РОЗБИТТЯ НА ДІАПАЗОНИ

Вступ. Розроблено модель автоенкодера для знешумлення, призначену для покращення якості T_1 -зважених магнітно-резонансних томографічних (МРТ) зображень мозку.

Методи. Ця модель використовує методи глибокого навчання і містить додаткові компоненти для підвищення продуктивності та збереження структурної цілісності зображень. Ключовими елементами є згорткові шари для вилучення ознак, нормалізація пакетів для стабільності, dropout для регуляризації та унікальний шар градієнтних обмежень для збереження плавності градієнтів.

Порівняно з іншими моделями, які також дають хороші результати, наша модель використовує менший набір даних. Інші моделі також застосовують неklasичні DICOM-зображення, що сильно відрізняється від реальних клінічних завдань.

Результати. Спеціалізована функція активації класифікує значення пікселів на основі попередньо визначених діапазонів, забезпечуючи адаптацію моделі до різних рівнів інтенсивності в даних МРТ. Архітектура складається зі структури енкодер-декодер із кількома етапами пониження вибірки та конкатенації, що сприяло відтворенню високоякісних зображень. Поєднання цих елементів привело до створення надійної моделі, здатної знижувати рівні шуму, зберігаючи при цьому важливі анатомічні деталі. Одною з переваг розробленої моделі є використання DICOM-зображень замість класичного підходу з великими наборами жрег-зображень, які через свою природу мають втрати і спотворення, що може призвести до неправильної діагностики.

Висновки. Використання DICOM-зображень дає більш повну картину і містить усі необхідні деталі медичного зображення, які нам вдалося відновити після застосування різних рівнів шуму. Застосування цієї моделі автоенкодера покращило чіткість і діагностичну цінність МРТ-сканів, забезпечуючи радіологів кращими інструментами для точнішого оцінювання. Дослідження було проведено на основі комплексного набору даних T₁-зважених МРТ-зображень мозку.

Ключові слова: автоенкодер, знешумлення, МРТ, глибоке навчання, горткова нейронна мережа, обмеження градієнта, відновлення зображення, медична візуалізація, DICOM.

Автор Д. Слюсаренко заявляє про відсутність конфлікту інтересів. Член редакційної колегії А. Нетреба заявляє про відсутність конфлікту інтересів та невтручання в процес оцінювання цієї статті відповідно до міжнародних стандартів публікаційної етики. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The author D. Sliusarenko declares no conflicts of interest. The member of the Editorial board A. Netreba declares no conflicts of interest and has not interfered in the evaluation process of this article, in accordance with international publication ethics standards. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

Дмитро РАМАЗАНОВ¹, д-р філософії, мол. наук. співроб.

ORCID ID: 0000-0002-0497-4860

e-mail: sarteon@gmail.com

Ігор АНОХІН¹, канд. фіз.-мат. наук

ORCID ID: 0000-0001-5880-0711

e-mail: igor.e.anokhin@gmail.com

Валерій ПУГАЧ¹, д-р фіз.-мат. наук, проф.

ORCID ID: 0000-0002-5204-9821

e-mail: valerii.pugach@gmail.com

Олексій КОВАЛЬЧУК¹, канд. тех. наук

ORCID ID: 0000-0002-2243-6230

e-mail: lexkov@gmail.com

¹Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

РОЗРОБКА ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ВОЛЬФРАМОВИХ МАТРИЧНИХ КОЛІМАТОРІВ ДЛЯ ПРОСТОРОВО ФРАКЦІОНОВАНОЇ РАДІАЦІЙНОЇ ТЕРАПІЇ

Вступ. *Просторово фракціонована радіаційна терапія є перспективним методом лікування онкологічних захворювань, що дозволяє зменшити дозове навантаження на здорові тканини.*

Методи. *Досліджено ефективність вольфрамових матричних коліматорів для просторово фракціонованої радіаційної терапії (ПФРТ). Проведено симуляції Монте-Карло та експериментальні дослідження для оцінювання фракціонування пучків гамма-квантів та електронів.*

Результати. *Показано, що під час опромінення неглибоких пухлин можна досягти високих показників фракціонування з PVDR (відношення максимальної дози до мінімальної дози після коліматора) – понад 10. Досліджено вплив товщини коліматора та енергії опромінювальних пучків на ефективність фракціонування. Вивчено роль вторинних частинок у формуванні дозового поля. Запропоновано конструкцію модульного вольфрамового коліматора, що дозволяє гнучко адаптувати параметри опромінення.*

Висновки. *Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення методів ПФРТ та підвищення ефективності лікування онкологічних захворювань.*

Ключові слова: *просторово фракціонована радіаційна терапія, моделювання Монте-Карло, CERN Fluka, променева терапія, мініпучкова терапія, металеві матричні коліматори, PVDR.*

Вступ

Просторово фракціонована радіаційна терапія є перспективним методом лікування онкологічних захворювань, що дозволяє зменшити дозове навантаження на здорові тканини. Цей метод базується на використанні просторово модульованих полів опромінення, які створюються скануванням мікропучків адронів або за допомогою спеціальних коліматорів. Ключовим

© Рамазанов Дмитро, Анохін Ігор, Пугач Валерій, Ковальчук Олексій, 2024

елементом ПФРТ у другому методі є матричні коліматори, які формують дозове поле утвореними мініпучками відповідно до конструкції матричного коліматора.

Основна ідея ПФРТ полягає у створенні неоднорідного розподілу дози з діапазонами високої та низької інтенсивності опромінювальних пучків. Це дозволяє досягти високої дози в пухлині, за зменшеного навантаження на здорові тканини. Ефективність такого підходу базується на різній радіочутливості нормальних та пухлинних клітин, а також на здатності здорових тканин до відновлення від отримання неоднорідної дози (Yan et al., 2020, pp. 20–38).

Оптимізація геометрії та матеріалу коліматорів є важливим завданням для підвищення ефективності лікування. Від вибору матеріалу, товщини коліматора, розмірів отворів та їх взаємного розташування залежить якість фракціонування пучка, що безпосередньо впливає на терапевтичний ефект. Тому дослідження оптимальних параметрів коліматорів є актуальним завданням для розвитку методів ПФРТ.

Методи

У процесі дослідження застосовано комп'ютерне моделювання та експериментальну частину. Експерименти проводилися на медичному прискорювачі LINAC з типовою терапевтичною енергією 6–25 MeV. Відстань від прискорювача до коліматора становила 1 м. Експеримент був націлений на дослідження ефективності фракціонування пучка гамма-квантів з енергією 6 MeV металевим коліматором. Розподіл інтенсивності створених коліматором мініпучків фотонів вимірювали мікропіксельним детектором TIMEPIX (колаборація MEDIPX, CERN) із чутливою ділянкою $14 \times 14 \text{ см}^2$ (256 x 256 пікселів з розміром $55 \times 55 \text{ мкм}^2$). Сегментація детектора дозволяє отримати двовимірне зображення профілю пучка в реальному часі (Pugatch et al., 2012, p. 682).

Для фракціонування пучка використовувалися два типи коліматорів: латунний і свинцевий. Латунний коліматор мав товщину 2 см і містив 6 щілин шириною 1 мм із відстанню між центрами сусідніх щілин 2,5 мм на площі $30 \times 30 \text{ см}^2$. Свинцевий коліматор є збіркою із пластин товщиною 3 мм із матрицею отворів 5×5 , діаметром 1 мм і кроком 3 мм (рис. 1).

Для оцінювання ефективності фракціонування проведено симуляції Монте-Карло в програмних пакетах GEANT4 та FLUKA (CERN). Ці програми коди дозволяють моделювати проходження іонізуючого випромінювання через речовину з урахуванням усіх фізичних процесів взаємодії. У симуляціях, зокрема, розглянуто модель фантома у вигляді куба $10 \times 10 \times 10 \text{ см}^3$ із плексигласу, що імітує біологічну тканину. Вольфрамовий коліматор розміром $4 \times 4 \text{ см}^2$ і довжиною 9–12 см розташовувався перед фантомом. У центрі коліматора було змодельовано матрицю отворів 5×5 діаметром 1 мм та відстанню між центрами отворів 3 мм.

Проведено симуляції для двох типів випромінювання:

- гамма-кванти з енергією 25 MeV, що відповідає максимальній енергії, яка використовується в сучасній променевій терапії;
- електрони з енергією 18 MeV, що є типовою енергією для електронної терапії.

Для кожного типу випромінювання були проведені симуляції для різної товщини коліматора з метою визначення оптимальних параметрів. Оцінювалися такі характеристики, як розподіл дози по глибині, профіль пучка на різних глибинах, співвідношення пік-долина дози (PVDR), а також внесок вторинних частинок у формування дозового поля.

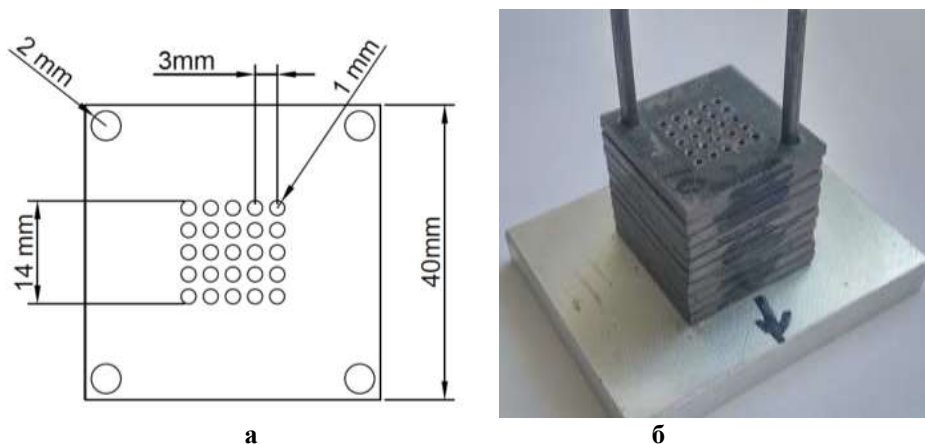


Рис. 1. Прототип свинцевого коліматора:

**а) креслення пластин з отворами – елементи збірки коліматора,
б) фото зібраного коліматора зі свинцю**

Результати

Експериментальні результати показали можливість фракціонування пучка гамма-квантів з енергією 6 MeV за допомогою латунного та свинцевого коліматорів. Для латунного коліматора товщиною 3,5 см досягнуто PVDR близько 3-4 (Anokhin, & Ramazanov, 2023, pp. 5–8). Зі свинцевим коліматором спостерігається покращення фракціонування при зменшенні товщини, що може бути пов'язано з особливостями виготовлення та якістю обробки отворів.

Симуляції Монте-Карло підтвердили експериментальні результати та показали, що вольфрам є оптимальним матеріалом для коліматорів ПФРТ через високу щільність та мінімальну необхідну товщину для поглинання пучків випромінювання. Для гамма-квантів з енергією 25 MeV близьке до повного, поглинання досягається за товщини вольфраму близько 6 см, тоді як для свинцю потрібно близько 10 см, а для заліза чи латуні – близько 20 см (Geant4 10.6.2 10⁶ events QGSP_BIC_HP).

Для гамма-квантів з енергією 25 MeV оптимальна товщина вольфрамового коліматора становить 12 см. При цьому досягається PVDR близько 12 на вході у фантом, що свідчить про високу якість фракціонування (Рамазанов, & Анохін, 2023а, с. 70–76). Однак спостерігається швидке згасання ефекту фракціонування по глибині: на глибині 1 см PVDR знижується до 5, а на глибині від 3 см – до 2 см. Це пов'язано з розсіюванням первинних фотонів та

генерацією вторинних електронів, які призводять до "розмивання" початкової структури пучка (рис. 2а).

Для електронного пучка з енергією 18 MeV оптимальна товщина коліматора становить 9 см. На вході у фантом досягається PVDR близько 20, що є значно кращим показником, ніж для гамма-квантів (Рамазанов, & Анохін, 2023b, с. 626–636). Проте спостерігається ще швидше розмивання просторового фракціонування по глибині: на глибині 1 см PVDR знижується до значень близько одиниці, а на глибині 2 см фракціонування майже зникає. Це пояснюється більш інтенсивним розсіюванням електронів у речовині порівняно із фотонами (рис. 2б) (Fluka 4.2 10^7 events).

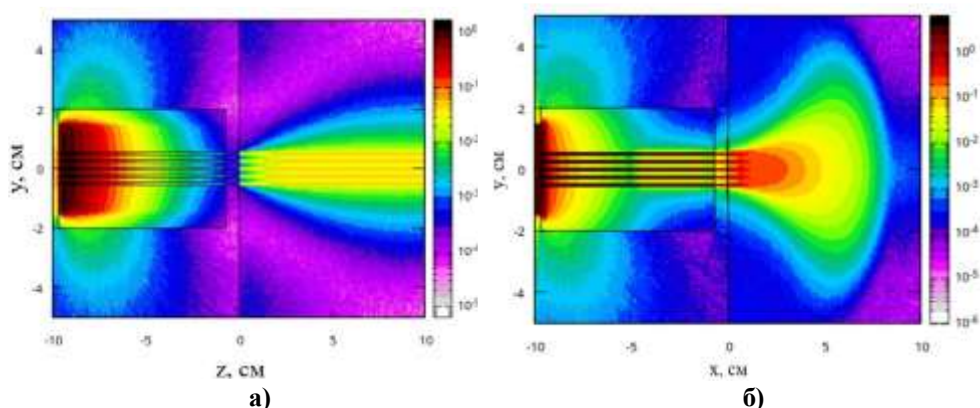


Рис. 2. Розподіл доставленої дози в коліматорі, середовищі навколо та фантомі вздовж пучка гамма-квантів з енергією 25 MeV (а), електронів енергією 18 MeV (б)

Важливу роль у формуванні профілю дози відіграють вторинні частинки. Для гамма-квантів енергетичний спектр вторинних електронів має максимум в діапазоні 20–25 MeV, що істотно впливає на розподіл дози. Ці високоенергетичні електрони дають значний внесок у дозу на глибині, частково компенсуючи ослаблення первинного пучка. У випадку електронного пучка генерується значна кількість вторинних гамма-квантів унаслідок гальмівного випромінювання, але їхній внесок у дозу менш значний порівняно з первинними електронами.

На основі отриманих результатів розроблено три версії конструкцій модульних вольфрамових коліматорів. Коліматори складаються з окремих пластин товщиною 3 мм, що дозволяє гнучко налаштовувати параметри під різні енергії та типи пучків. Центральні пластини мають отвори діаметром 1 мм для формування фракціонованого пучка. Запропонована конструкція дає можливість легко змінювати товщину коліматора та кількість каналів, адаптуючи його під конкретні умови опромінення.

Модульна конструкція коліматора має ряд переваг, а саме:

- гнучкість у налаштуванні параметрів фракціонування шляхом зміни кількості та розташування отворів;
- можливість створення складних геометрич опромінення для адаптації до форми пухлини;
- економічна ефективність за рахунок можливості повторного використання окремих елементів.

Дискусія і висновки

Проведені експериментальні дослідження та симуляції Монте-Карло підтвердили можливість досягнення високих показників фракціонування ($PVDR > 10$) для гамма-квантів та електронів при використанні вольфрамових коліматорів оптимальної товщини. Це свідчить про перспективність застосування ПФРТ для лікування поверхневих новоутворень. Однак виявлено швидке згасання ефекту фракціонування по глибині, що обмежує застосування методу для глибоко розташованих пухлин. Це вказує на необхідність подальших досліджень для розробки методів збереження структури фракціонованого пучка на більших глибинах.

Запропонована конструкція модульного вольфрамового коліматора дозволяє гнучко налаштовувати його параметри під різні умови опромінення, що є перспективним для подальших досліджень та клінічного застосування ПФРТ. Така конструкція може стати основою для створення адаптивних систем опромінення, які дозволять оптимізувати розподіл дози для кожного конкретного пацієнта.

Отримані результати можуть бути використані для проєктування нових коліматорів з підвищеною ефективністю формування терапевтичного пучка. Вони також дають важливу інформацію для розробки протоколів лікування з використанням ПФРТ.

Подальші дослідження будуть спрямовані на експериментальну перевірку розроблених моделей та оцінювання їх впливу на дозовий розподіл при ПФРТ. Важливим напрямом є також пошук шляхів збільшення глибини ефективного фракціонування, що може передбачати використання комбінованих методів опромінення або розробку нових матеріалів для коліматорів.

Подальші роботи будуть присвячені дослідженню активації вольфраму під дією іонізуючого випромінювання.

Внесок авторів: Дмитро Рамазанов – експерименти, написання чернетки статті; Ігор Анохін – програмне забезпечення, моделювання, формальний аналіз; Валерій Пугач – концепція, методологія досліджень, редагування; Олексій Ковальчук – техніка експерименту, написання – перегляд і редагування.

Подяки, джерела фінансування. Дана робота виконувалася в рамках декількох тем та грантів: 0116U002883 "Розробка фізико-технічних принципів просторово фракціонованої адронної терапії" при інституті ядерних досліджень НАН України; № Ф31-2021 "Розробка детекторних систем для експериментів на прискорювачах та технологій для фізики прискорювачів". Етап 1: "Радіаційно стійка мікродетекторна система для вимірювання просторових та часових характеристик пучків заряджених частинок та фотонів", Інститут ядерних досліджень НАН України; № Ф31-2022 "Розробка детекторних систем для

експериментів на прискорювачах та технологій для фізики прискорювачів". Етап 2: "Система колімації та моніторингу високоінтенсивних пучків для просторово фракціонованої радіаційної терапії", Інститут ядерних досліджень НАН України; Grant #3014: grant agreement No.871072 by EURIZON project, Інститут ядерних досліджень НАН України.

Список використаних джерел

Рамазанов, Д.М., & Анохін, І.Є. (2023a). Монте-Карло симуляції вольфрамових матричних коліматорів для просторово фракціонованої радіаційної терапії. *Науковий вісник НЛТУ України*, 33(5), 70–76. <https://doi.org/10.36930/40330509>

Рамазанов, Д.М., & Анохін, І.Є. (2023b). Розробка вольфрамового матричного коліматора для електронної просторово фракціонованої терапії. *Наука і техніка сьогодні*, 12(26), 626–636. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-12\(26\)-626-636](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-12(26)-626-636)

Anokhin, I., & Ramazanov, D. (2023). Matrix metal collimators studies for the spatially fractionated radiation therapy. *Computer-integrated technologies: education, science, production*, 53, 5–8. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-53-01>

Pugatch, V., Campbell, M., Chaus, A., Kovalchuk, O., Llopart, X., Okhrimenko, O., ... & Tlustos, L. (2012). Metal micro-detector TimePix imaging synchrotron radiation beams at the ESRF Bio-Medical Beamline ID17. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 682, 8–11. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2012.03.049>

Yan, W., Khan, M.K., Wu, X., Simone II, C.B., Fan, J., Gressen, E., ... & Mourad, W.F. (2020). Spatially fractionated radiation therapy: History, present and the future. *Clinical and translational radiation oncology*, 20, 30–38. <https://doi.org/10.1016/j.ctro.2019.10.004>

References

Anokhin, I., & Ramazanov, D. (2023). Matrix metal collimators studies for the spatially fractionated radiation therapy. *Computer-integrated technologies: education, science, production*, 53, 5–8. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-53-01>

Pugatch, V., Campbell, M., Chaus, A., Kovalchuk, O., Llopart, X., Okhrimenko, O., ... & Tlustos, L. (2012). Metal micro-detector TimePix imaging synchrotron radiation beams at the ESRF Bio-Medical Beamline ID17. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 682, 8–11. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2012.03.049>

Ramazanov, D.M., & Anokhin, I.E. (2023a). Monte Carlo simulations of tungsten array collimators for spatially fractionated radiation therapy. *Scientific Bulletin of UNFU*, 33(5), 70–76. <https://doi.org/10.36930/40330509>

Ramazanov, D.M., & Anokhin, I.E. (2023b). Development of a tungsten matrix collimator for electronic spatially fractionated therapy. *Science and Technology Today*, 12(26), 626–636. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-12\(26\)-626-636](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-12(26)-626-636)

Yan, W., Khan, M.K., Wu, X., Simone II, C.B., Fan, J., Gressen, E., ... & Mourad, W.F. (2020). Spatially fractionated radiation therapy: History, present and the future. *Clinical and translational radiation oncology*, 20, 30–38. <https://doi.org/10.1016/j.ctro.2019.10.004>

Отримано редакцією збірника / Received: 11.09.24

Прорецензовано / Revised: 24.09.24

Схвалено до друку / Accepted: 23.10.24

Dmytro RAMAZANOV¹, PhD, Junior Researcher
ORCID ID: 0000-0002-0497-4860
e-mail: sarteon@gmail.com

Igor ANOKHIN¹, PhD (Phys. & Math.)
ORCID ID: 0000-0001-5880-0711
e-mail: igor.e.anokhin@gmail.com

Valerii PUGATCH¹, DSc (Phys. & Math.), Prof.
ORCID ID: 0000-0002-5204-9821
e-mail: valerii.pugach@gmail.com

Oleksii KOVALCHUK¹, PhD (Engin.)
ORCID ID: 0000-0002-2243-6230
e-mail: lexkov@gmail.com

¹Institute for nuclear research NASU, Kyiv, Ukraine

DEVELOPMENT AND OPTIMIZATION OF TUNGSTEN MATRIX COLLIMATORS FOR SPATIALLY FRACTIONATED RADIATION THERAPY

Introduction. *This study investigates the effectiveness of tungsten matrix collimators for spatially fractionated radiation therapy (SFRT). The research combines experimental studies and Monte Carlo simulations to evaluate the fractionation of gamma-ray and electron beams. The results demonstrate the possibility of achieving high fractionation indicators (PVDR over 10) for irradiation of shallow tumors.*

Methods. *The experiments were conducted using a Varian Clinac iX medical accelerator with 6 MeV gamma-rays. Two types of collimators were tested: brass and lead. Monte Carlo simulations were performed using GEANT4 and CERN Fluka software packages, modeling a 10×10×10 cm plexiglass phantom and a tungsten collimator with a 5×5 matrix of 1 mm diameter holes.*

Results. *The study examined the effects of collimator thickness and radiation energy on fractionation efficiency. For 25 MeV gamma-rays, the optimal tungsten collimator thickness was found to be 12 cm, achieving a PVDR of about 12 at the phantom entrance. For 18 MeV electrons, a 9 cm thick collimator provided a PVDR of about 20. However, the fractionation effect rapidly diminished with depth for both radiation types. The role of secondary particles in dose distribution formation was also investigated. For gamma-rays, high-energy secondary electrons significantly contributed to the dose at depth. For electron beams, secondary gamma-rays from bremsstrahlung were less significant compared to primary electrons.*

Conclusions. *Based on these results, three versions of modular tungsten collimator designs were developed. These collimators consist of separate 3 mm thick plates, allowing flexible adjustment of parameters for different energies and beam types. The study concludes that while SFRT shows promise for treating surface neoplasms, the rapid decay of the fractionation effect with depth limits its application for deep-seated tumors. The proposed modular collimator design offers flexibility for further research and potential clinical applications in adaptive irradiation systems.*

Keywords: *spatially fractionated radiation therapy, Monte Carlo simulation, CERN Fluka, radiation therapy, mini beam therapy, metal matrix collimators, PVDR.*

Автори Д. Рамазанов, І. Анохін та О. Ковальчук заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Член організаційного комітету В. Пуґач заявляє про відсутність конфлікту інтересів та невтручання в процес оцінювання цієї статті відповідно до міжнародних стандартів публікаційної етики. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors D. Ramazanov, I. Anokhin and O. Kovalchuk declare no conflicts of interest. The member of the Organizing committee V. Pugatch declares no conflict of interest and has not interfered in the evaluation process of this article, in accordance with international publication ethics standards. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

UDC 577.356:577.322.3

DOI: <https://doi.org/10.17721/3041-1491/2024.11-33>

Oleksii KHOROLSKYI¹, PhD (Phys. & Math.), Assoc. Prof.

ORCID ID: 0000-0001-9272-0395

e-mail: khorolskiy.alexey@gmail.com

Natalia FUDULEI¹, PhD Student

e-mail: nata.fudulei@gmail.com

Oksana STOLIARYK², PhD Student

Scopus ID: 57988121200

e-mail: adiabata384@gmail.com

Wei ZHANG², Student

e-mail: zhang.wei@onu.odessa.ua

¹National Pedagogical University, Poltava, Ukraine

²Odesa I. I. Mechnikov National University, Odesa, Ukraine

THE EFFECT OF A DYNAMIC PHASE TRANSITION IN WATER ON THE ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF AQUEOUS ALBUMIN SOLUTIONS

Introduction. *The structure of human serum albumin (HSA) in aqueous solutions undergoes significant changes depending on temperature, concentration, acid-base balance (pH), the presence of salts, etc.*

Methods. *The temperature dependence of the zeta potential of human serum albumin macromolecules (1 g/l) in a 0.075 M (0.45 wt. %) aqueous solution of sodium chloride in the temperature range (30–75) °C at the initial pH 7.4 was analyzed.*

Results. *Experimental values of the zeta potential increase sharply from –27 mV at the temperature of 30°C to zero at around 42°C, and then oscillate near zero up to the denaturation temperature. In the vicinity of 42°C a dynamic phase transition in water occurs, which divides the range of the liquid phase of water into two intervals: in the first interval, the thermal motion of water molecules has a crystal-like character, and in the second interval, water molecules move like ones in argon, i.e. the movement of molecules has an argon-like character.*

Conclusions. *The analysis shows that the temperature dependence of the zeta potential of albumin macromolecules in dilute aqueous solutions near the temperature of the dynamic phase transition in water is similar to the behaviour of magnetization around the Curie-Weiss critical point for the simplest magnets. Thus, the zeta potential can be considered as an order parameter for the thermodynamic Landau potential, which has the same structure as for the simplest magnets near their Curie-Weiss critical points. Further research will be aimed at studying the peculiarities of the applicability of the revealed analogy for the zeta potential of albumin macromolecules under different conditions of the solution.*

Keywords: *dynamic phase transition, human serum albumin, zeta potential, aqueous solutions.*

Introduction

The structure of human serum albumin (HSA) in aqueous solutions undergoes significant changes depending on temperature, concentration, acid-base balance (pH), the presence of salts, etc. With a change in the pH value in the solution, the

© Khorolskiy Oleksii, Fudulei Natalia, Stoliaryk Oksana, Zhang Wei, 2024

charges of amino acid residues of macromolecules also change, and therefore the total charge of albumin macromolecules. The redistribution of charges on the surface of the macromolecule leads to a change in the spatial structure of the macromolecule and contributes to the processes of oligomerization of albumin macromolecules (Barbosa et al., 2010). Although a significant number of works have been devoted to the study of the structure of albumin in aqueous solutions, there is currently no effective model for the relationship between the structure and electrophysical properties of the albumin macromolecule and changes in the properties of aqueous solutions. The goal of this work is to clarify the influence of a dynamic phase transition in water on the temperature behavior of the zeta potential of HSA macromolecules in an aqueous solution of sodium chloride.

Methods

Experimental data on the temperature dependence of the zeta potential of human serum albumin macromolecules in aqueous solutions of sodium chloride are taken from (Bardik et al., 2020, p. 4). Human serum albumin powder was dissolved in 0.075 M (0.45 wt. %) aqueous sodium chloride solution at an initial pH 7.4 at 30 °C to obtain a protein concentration of 1 mg/ml. The zeta potential of albumin macromolecules was measured using a Zetasizer Nano ZS (Malvern Panalytical, UK) in the temperature range $T = (303\text{--}348)$ K (Bardik et al., 2020, p. 4). We estimated the relative errors of zeta potential and temperature measurement to be equal to $\varepsilon(\zeta) = 5\%$ and $\varepsilon(T) = 0.3\%$, respectively.

Results

The electrophysical properties of macromolecules in solution are closely related to the value of the zeta potential, which can be measured experimentally. Zeta-potential (ζ) as the difference between the potentials of the aqueous medium and the stationary layer of the liquid surrounding the macromolecule allows us to draw conclusions about the total charge and stability of macromolecules in solution. One of the peculiarities of the behavior of the zeta potential of human serum albumin macromolecules in aqueous solution is the existence of a characteristic point – the isoelectric point of albumin (pH_0), at which the zeta potential of albumin is zero. This means that the total charge of the macromolecule is close to zero, so there are no repulsive electrostatic forces between macromolecules, and this can contribute to the processes of association and oligomerization of albumin macromolecules.

First it is worth noting that in (Bardik et al., 2020, p. 3) it was established that the addition of NaCl ions changes the value of the hydrodynamic radii of HSA macromolecules in the range of (5.0 ± 0.3) nm. Nevertheless, the values of the hydrodynamic radii of HSA macromolecules remain practically constant in the temperature interval (30–50) °C.

The values of the zeta potential of HSA macromolecules in aqueous solutions of sodium chloride in the temperature range (30–75) °C are presented in Fig. 1. As can be seen, the value of the zeta potential increases sharply from –27 mV at the temperature of 30 °C up to zero at about 42 °C, and then it oscillates near zero up to the denaturation temperature. It should be noted here that in vicinity of 42 °C the zeta

potential takes a zero value, which is characteristic of the isoelectric point (pH_0), and the liquid system is not particularly stable in this region. In (Bulavin et al., 2020, p. 795) it was shown that the temperature of 42 C divides the region of the liquid state of pure water into two intervals: $T_{tr} < T < (T_{tr} + 42)$ and $(T_{tr} + 42) < T < T_c$, where T_{tr} is the triple point and T_c is the critical point of pure water. In the first interval, the thermal motion of water molecules has the crystal-like character, while in the second interval, water molecules move in the same way as in argon, i.e. the molecular motion has argon-like character. Therefore, it can be concluded that a dynamic phase transition in water takes place in the region of 42 C.

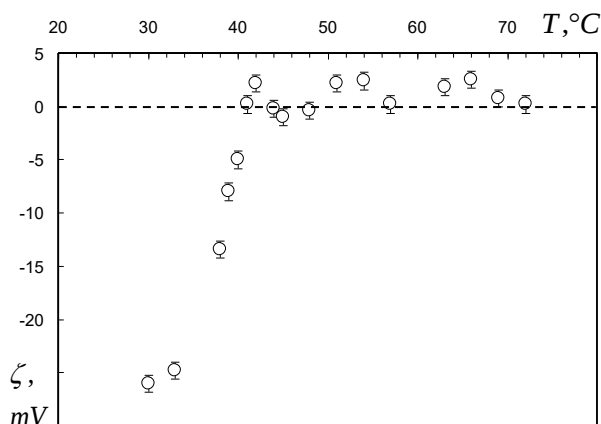


Fig. 1. Temperature dependence of the zeta potential of macromolecules of human serum albumin in 0.075 M aqueous solution of sodium chloride at an initial pH 7.4 at 30 °C (Bardik et al., 2020, p. 4)

Here it is necessary to pay attention to the fact that the temperature dependence of the zeta potential of HSA macromolecules in aqueous salt solutions near the 42 C is similar to the behavior of magnetization (m_z) near the Curie–Weiss critical point (T_{CW}) of magnet (Snoke, 2020). Indeed,

$$m_z = \begin{cases} 0, & T > T_{CW}, \\ \neq 0, & T < T_{CW}. \end{cases} \quad (1)$$

The behaviour of the zeta potential (ζ) could be reproduced the same:

$$\zeta \approx \begin{cases} 0, & T > T_H, \\ \neq 0, & T < T_H, \end{cases} \quad (2)$$

where $T_H = 42$ C and can be called a peculiar point for the subsystem of ions, which reflects the peculiarities of thermal motion in water.

Thus, the zeta potential in the aqueous albumin-salt solution near the peculiar point 42 C behaves similarly to the order parameter near the critical point of the magnetic system. This allows us to interpret this singular point as one for a dynamic

phase transition (Bardik et al., 2020, pp. 1–2). Near this point, thermodynamic properties, similar to volume properties (the size of albumin macromolecules), remain practically unchanged, while the electrophysical properties of protein molecules change very significantly. In particular, this is manifested in the specific dependence of the zeta potential on pH. Thereby, the dependence of zeta potential on the difference $\text{pH} - \text{pH}_0$ should be similar to the behavior of the magnetization (M_z), which is considered as a function of the magnetic field strength (H) for the simplest ferromagnetic:

$$M_z(T, H) \sim \tanh \beta H, \quad (3)$$

where $\beta = T_* / T$ and T_* is so called the Curie–Weiss critical point. Given the similarity, the zeta potential can be described by a similar expression, where α is some function of temperature:

$$\zeta(T, \text{pH}) \sim \tanh \alpha(\text{pH} - \text{pH}_0). \quad (4)$$

This result is quite surprising and it requires a physical explanation. To understand the similarity mechanism for zeta potential and magnetization, we have to apply the thermodynamic Landau potential depending on the order parameter. Identifying the order parameter with the magnetization in the case of a magnet and the zeta potential in the case of aqueous albumin solutions, in our next publication we will construct a thermodynamic Landau potential, assuming a conceptually similar framework for magnets and solutions.

Discussions and conclusions

The paper analyzes the temperature dependence of the zeta potential of human serum albumin macromolecules in a 0.075 M (0.45 wt. %) aqueous solution of sodium chloride at an initial pH 7.4 at 30 °C. The analysis shows that the temperature dependence of the zeta potential of albumin macromolecules in diluted aqueous solutions near the temperature of the dynamic phase transition in pure water (near the 42 °C) is similar to the behavior of magnetization in the vicinity of the Curie–Weiss critical point for the simplest magnets. It is concluded that the zeta potential can be considered as an order parameter for the thermodynamic Landau potential having the same structure as the one for the simplest magnets near their Curie-Weiss critical points. In order to guarantee the similarity of the magnetic and polarization properties, we conclude that the difference $\text{pH} - \text{pH}_0$ takes the sense of the field conjugate to the order parameter, i.e. is the analogue of the magnetic field for magnets. Further research will be aimed at studying peculiarities of applicability of the revealed analogy for the zeta potential of albumin macromolecules under different conditions.

Authors' contribution: Oleksii Khorolskyi – conceptualization, methodology, investigation, visualization, writing – original draft preparation, writing – reviewing and editing; Natalia Fudulei – investigation, validation, writing – original draft preparation; Oksana Stoliaryk – formal analysis, investigation, writing – original draft preparation; Wei Zhang – data curation, writing – original draft preparation.

References

Barbosa, L.R.S., Ortore, M.G., Spinozzi, F., Mariani, P., Bernstorff, S., & Itri, R. (2010). The importance of protein-protein interactions on the pH-induced conformational changes of bovine serum albumin: A small-angle X-ray scattering study. *Biophysical Journal*, 98(1), 147–157. <https://doi.org/10.1016/j.bpj.2009.09.056>

Bardik, V., Fisenko, A.I., Magazu, S., & Malomuzh, N.P. (2020). The crucial role of water in the formation of the physiological temperature range for warm-blooded organisms. *Journal of Molecular Liquids*, 112818. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.112818>

Bulavin, L.A., Gotsulskiy, V.Y., Malomuzh, N.P., & Fisenko, A.I. (2020). Crucial role of water in the formation of basic properties of living matter. *Ukrainian Journal of Physics*, 65(9), 794–801. <https://doi.org/10.15407/ujpe65.9.794>

Snoke, D.W. (2020). *Solid State Physics: Essential Concepts* (2nd ed.). Cambridge University Press.

Отримано редакцією збірника / Received: 13.08.24

Прорецензовано / Revised: 28.08.24

Схвалено до друку / Accepted: 01.10.24

Олексій ХОРОЛЬСЬКИЙ¹, канд. фіз.-мат. наук, доц.

ORCID ID: 0000-0001-9272-0395

e-mail: khorolskiy.alexey@gmail.com

Наталія ФУДУЛЕЙ², асп.

e-mail: nata.fudulei@gmail.com

Оксана СТОЛЯРИК², асп.

Scopus ID: 57988121200

e-mail: adiabata384@gmail.com

Вей ЧЖАН², студ.

e-mail: zhang.wei@onu.odessa.ua

¹Полтавський національний педагогічний університет імені В. Г. Короленка, Полтава, Україна

²Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, Одеса, Україна

ВПЛИВ ДИНАМІЧНОГО ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДУ У ВОДІ НА ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВОДНИХ РОЗЧИНІВ АЛЬБУМІНУ

Вступ. Структура сироваткового альбуміну людини (ЧСА) у водних розчинах зазнає значних змін залежно від температури, концентрації, кислотно-лужної рівноваги (рН), наявності солей тощо.

Методи. Проаналізовано температурну залежність дзета-потенціалу макромолекул сироваткового альбуміну людини в 0,075 М (0,45 мас. %) водному розчині хлориду натрію в інтервалі температур (30–75) °С за початкового рН 7,4.

Результати. Експериментальні значення дзета-потенціалу різко зростають від –27 мВ при температурі 30 °С до нуля в околі 42 °С, а потім коливаються поблизу нуля аж до температури денатурації. Нульове значення дзета-потенціалу характерно для ізоелектричної точки альбуміну, коли загальний заряд макромолекули дорівнює нулю і між макромолекулами майже відсутні електростатичні сили відштовхування, що може сприяти процесам асоціації та олігомеризації макромолекул альбуміну. З іншого боку, в околі температури 42 °С у воді відбувається динамічний фазовий перехід, який розбиває діапазон рідкої фази води на два інтервали: у першому інтервалі тепловий рух молекул води має кристалоподобний характер, а в другому інтервалі молекули

води рухаються подібно молекулярним рухам в аргоні, тобто рух молекул має аргоноподібний характер.

В и с н о в к и . Аналіз показує, що температурна залежність дзета-потенціалу макромолекул альбуміну в розведених водних розчинах поблизу температури динамічного фазового переходу у воді подібна до поведінки намагніченості в околі критичної точки Кюри-Вейса для найпростіших магнітів. При цьому дзета-потенціал можна розглядати як параметр порядку для термодинамічного потенціалу Ландау, який має таку саму структуру, як і для найпростіших магнітів поблизу їхніх критичних точок Кюри-Вейса. Подальші дослідження будуть спрямовані на вивчення особливостей застосовності виявленої аналогії для дзета-потенціалу макромолекул альбуміну за різних умов водного оточення.

Ключові слова: динамічний фазовий перехід, сироватковий альбумін людини, дзета-потенціал, водні розчини.

Автори О. Хорольський, Н. Фудулей, О. Столярик та В. Чжан заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors O. Khorolskyi, N. Fudulei, O. Stoliaryk and W. Zhang declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В МЕДИЦИНІ INNOVATION TECHNOLOGIES IN MEDICINE

УДК 340.77

DOI: <https://doi.org/10.17721/3041-1491/2024.11-34>

Alina VELIGURA

Scopus ID: 24503806100

e-mail: alina.veligura@philips.com

Philips, Eindhoven, Netherlands

INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS AS A TOOL IN SECURING INNOVATION

Introduction. *This article introduces the main types of legal rights, with which an intellectual property asset may be protected.*

Methods. *An analysis of literature related to laws protecting intellectual property in main world-market jurisdictions was carried out. Presented herein results are based on this analysis and generalization of own experience.*

Results. *This article explains the value of intellectual property assets in the context of innovative products and describes the main types of intellectual property rights that can be used to protect these assets.*

Conclusions. *In the context of one's innovative activity, the article further explains differentiations (protected subject-matter, registration requirements, terms, etc.) between different intellectual property rights and a benefit of their protection to a given innovation. Several examples from Philips innovation in consumer electronics and medical domains are mentioned to illustrate various strategies that can be taken in creating optimized protection by using a specific selection of the intellectual property right types.*

Keywords: *intellectual property, intellectual property rights, innovation.*

Introduction

In many fields of industry, intellectual property (IP) forms an essential part of the business assets in enabling its owner to obtain an advantage over competitors (World Intellectual Property Organization (WIPO), 2024).

There are five main types of IP, each of which is protectable in law by a corresponding intellectual property right (IPR):

1. Products of the original creative work (text, photo, software, etc.) are protected by a copyright;
2. Technical inventions can be protected by patent rights;
3. Know-how, information which has the highest value to its owner when kept secret, can be protected by a trade secret;
4. Shape or aesthetic aspects of an object, including its digital representation, can be protected by a design (industrial) right; and
5. Distinguishing signs in relation to goods or services can be protected by trademark rights.

While several IPRs, such as copyrights (in most countries) and trade secrets, do not require requesting their registration at a specialized authority, other IPRs must be registered at the corresponding national authority and once granted as a right be renewed (maintained). Registration and maintenance of the IPRs requires investment; and depending on the size of one's business activities the investment may become of a substantial size. Therefore, in conditions of a limited budget (let us be honest, these are often the most applicable conditions) it is important to understand differentiating features of one's innovation and select those IPRs, which most efficiently protect these features within the given budget.

Methods

An analysis of literature related to laws protecting intellectual property in main world-market jurisdictions was carried out. Presented herein results are based on this analysis and generalization of own experience.

Results

Copyrights. Duration of the available protection to a given IPR may vary per country. Copyright protection in most of countries lasts until at least 50 years after the author's death. Noteworthy, in the USA quite a different duration of copyright protection exists. Initiated by Disney company the copyright law in the USA was changed several times, wherein the latest change took place in 1998 with Congress passing the Sonny Bono Copyright Term Extension Act, more commonly known as the Mickey Mouse Protection Act. This Act extended copyright protection for corporations to ninety-five years from the first publication or 120 years from content creation, whichever was shorter. Thereby, enabling Disney company enjoying copyright protection over the Mickey Mouse character as depicted in "Steamboat Willie" film for almost a century. Eventually on January 1, 2024, this right expired, opening the door to a new creative usage of this character by others.

This brings us to an important aspect of an IP right: each right has an owner and usage of such a right by others requires the owner's permission. It is important to keep in mind, when working on one's own creative content, be it a preparation of the scientific manuscript or a presentation at the conference, that usage of the intellectual property of others, be it a picture from the internet or copied text, shall take place without violation of their (copy)rights.

The software code is also protected by a copyright; and if one's differentiating innovation resides in unique software solutions, copyright and trade secret (which are explained in more detail below) can be the best IPRs for protecting such innovation. However, additional attention should be paid to the usage of the open-source software and IP license conditions associated with it. In some instances, such a usage in one's own software code may result in an obligation of making said software code or other IP originating from this development available to others, thereby making your own solution potentially less exclusive.

Separate attention should be given to the usage of an output from generative Artificial Intelligence (AI) models. This output may include copyrighted work of others, who have not given their permission to have their work being used. Of course,

one should not forget that entering confidential information as an input to the generative AI model (unless one is certain about confidential conditions of the AI model provider) would potentially make this information available to others.

Patents and trade secrets. Innovative solutions having technical character and susceptible of industrial application may be protected by either patent rights or trade secrets. It is worth mentioning that trade secret protection is also available for non-technical know-hows, which will not be covered by this article. The choice of the most suitable IPR for protecting one's technical innovation may depend on a specific character of said innovation that shall be combined with the legal obligations imposed by the IPR chosen for the protection.

Patents are exclusive rights granted by an authority to an inventor for their invention. Having a patent implies making a deal: the right to exclude others from exploiting the invention (during a limited period) versus the obligation to disclose the invention in detail to support technical progress. While specific details of invention's eligibility to a patent protection may differ from one country to another, there is one main criterion which is the same in all countries: an invention shall be novel (not forming a part of the prior art). Invention not forming a part of the prior art means that nowhere in the world such an invention has been: (i) described in any document; or (ii) disclosed orally (for example, at the conference or workshop); or (iii) used in any way. Only after meeting a condition of novelty the invention can be further assessed on its patentability. The requirement of the detailed invention disclosure in the patent makes patents to be the best choice of protection of those inventions, which when implemented in a product (thus, made available to the public) can be reproduced by others. In case of an unauthorized invention usage taking place (in legal terms called infringement), the patent owner can use its patent, protecting said invention, to stop others from using it.

On the other hand, trade secret protection shall be used for the innovations which have the highest value to their owner, when kept secret. In principle, all inventions, irrespective of whether they can be reproduced from the product or not, can be protected by a patent, provided they pass the patentability criteria. However, in some instances a contribution of the invention to the product may be too complex for one's ability to detect (and thereby potentially reproduce) the presence of the invention in said product. In this case, the best choice for protection of this sort of inventions is a trade secret. Choosing for a patent protection may not be wise, because of an obligation of providing a detailed disclosure of one's invention in a patent. Why teach the public about your invention, if eventually it cannot be derived from the product it is implemented in? The infringement of patents protecting this sort of inventions may be hard to prove, making it hard to stop others from using your innovation. Of course, another important differentiator between patent and trade secret protections is their durations. In most countries, patent protection term is 20 years from the moment of filing a request for it, while trade secrets have unlimited term of protection as long as they are kept secret.

A nice example of choosing the most appropriate IPR for protecting a given innovation depending on one's business model was an approach taken by Philips and Sony in the optical recording technology used in compact discs (CDs). In the late 70s both Philips and Sony independently were working on an alternative to vinyl and compact cassette technologies to create a higher density and more compact solutions for audio recording medium (de Haan, & Luxon, 2022). While CDs offered benefits of bringing audio content of a higher sound quality on a physical carrier almost insensitive to dust and scratches, convincing the whole music and record industry to switch to a new audio standard not only required good innovation but also a "simple" to potential customers business model enabling return on the innovation investments made by its owners. Therefore, Philips and Sony joined forces and together defined specifications for a CD standard. These technical specifications were described in a series of books that became known as the "Rainbow Books", while the inventions enabling the optical storage technology meeting the described technical specification were protected with patents. As a result for this standardization, whoever wished to make a CD, which would meet the standard specifications and therefore be suitable for an audio recording and be readable by an installed base of CD reading systems, had to use the inventions enabling this standard and protected by the corresponding patents. In this business model, whether the usage of inventions could have been derived from an examination of CD or not no longer mattered, because by being compliant with the standard one had to accept that the patents protecting the CD technology were used. The companies received a return on their optical recording technology investment by collecting license revenue from the sales of the CDs as well as the CD reading hardware (Lengova, 2024).

In some instances, one's business model may not be based on making the developed technology standardized and the competitive advantage of this technology can be achieved by keeping it secret. Realizing trade secret protection, in contrast to majority of other IPRs, does not involve its formal registration at the authorities but requires implementing reasonable trade secret protection measures, measures which assure that limited number of people have access to the secret information and are legally bound to keep it secret. An example of a such technology can be Philips Azurion. It is a high-performance image-guided therapy system that allows teams of interventional clinicians to perform complex cardiac interventions. This system uses trade secret technologies to deliver clarity of the medical images obtained at a lower dose of the X-ray exposure that is superior to any other system.

Designs and trademarks. Finalizing the explanation of specific benefits of each IPR type in a "toolbox" available for the IP asset protection let us focus on the remaining two types of legal IP rights: designs and trademarks. In most cases when products with embedded innovation are introduced to the market, they take either physical or digital (such as software) appearance. These aesthetic aspects of the products, when they are new and original, can be protected with design rights.

The term of the design protection varies from 15 to 25 years across different countries, wherein most of the European countries offer 25 years of the design protection.

It is important to realize that potential customers will get their first impression of the product from its appearance. Thus, if part of one's business model lies in creating a differentiating exterior look of the product offer, it is advisable to register a corresponding design protection to be able to use it against any future unauthorized copies of the product.

Coming back to the CD example, Philips developed an iconic CD holding case, which consisted of a three-piece package made of polystyrene, with a hinged top and a plastic tray that held the disc in place with a central hub. The story of the CD case creation and its designer's consideration into giving the case a perfect high-tech look that resulted in the name the "jewel case" has been described by many sources. An interesting part of this innovation is that the case did not only have features aesthetically attractive to the consumers but also solved specific technical problems of an automatic assembly (essential for mass production), good grip on a CD and its easy removal. The technical aspects of the "jewel case" were protected by the patents. Billions of "jewel cases" have been produced since 1982 at some point reaching an output of as many as eight billion a year. Thereby creating a large return on the investment made for registering patent and design rights for this technology (de Haan, & Luxon, 2022).

Until recently an overall trend in industry for design protection was to focus on designs of physical products. However, in nowadays digital age a rising need in protecting innovation embedded in a digital content resulted in increased number of design rights registrations for user interface features. An example of such a trend can be Philips design registration filed for a character of the elephant, Ollie the Elephant, used in Philips Pediatric Coaching solution, which deploys gamification to help children better prepare for their MRI scan by means of interacting with one of the characters. An alternative or complementary IP protection for such a character may be a trademark registration, applicable in the event when the character is used as a graphical differentiator for one's goods or services.

One advantage of a trademark right over other already discussed registered rights is that as long as the registration is regularly renewed (in most countries every 5 to 10 years) and used (some authorities have a proof of use requirement) the right remains in force and virtually offers an "indefinite" protection. On this note, let us conclude with the Mickey Mouse example the article started with, while the copyright to its earliest version expired, Disney company still holds trademark registrations for the Mickey Mouse name and plurality symbols associated with this character.

Discussion and conclusions

This article explains the value of the IP assets in the context of the innovative products and describes an IP protection "toolbox", which includes the main types of legal rights that may be used to protect these IP assets to maintain products advantage over a competition. Good understanding of differentiations (protected subject-

matter, registration requirements, terms, etc.) of the IP right types and their applicability to the distinguishing features of the products enables one selecting the most optimal protection from the IP "toolbox" for a given innovation. Several examples from Philips innovation in consumer electronics and medical domains are mentioned to illustrate various strategies in creating an optimized protection by means of a specific selection of intellectual property rights.

References

World Intellectual Property Organization (WIPO). (2024). *What is Intellectual Property?* <https://www.wipo.int/portal/en/>

de Haan, P., & Luxon, L. (2022). *100 years Intellectual Property & Standards at Philips*. Philips International B.V.

Lengova, M. (2024). *Music box for the future*. Philips Museum. <https://www.philips.nl/en/a-w/philips-museum/stories/music-box-for-the-future.html>

Отримано редакцією збірника / Received: 04.09.24

Прорецензовано / Revised: 20.09.24

Схвалено до друку / Accepted: 23.10.24

Аліна ВЕЛІГУРА

Scopus ID: 24503806100

e-mail: alina.veligura@philips.com

Філіпс, Ейндховен, Королівство Нідерландів

ПРАВА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ ЯК ІНСТРУМЕНТ ЗАХИСТУ ІННОВАЦІЙНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ

Вступ. У багатьох галузях промисловості інтелектуальна власність є важливою частиною бізнес-активів, що дозволяє її власнику отримати перевагу над конкурентами.

Методи. Проведено аналіз літератури, що стосується законодавства про захист інтелектуальної власності в основних юрисдикціях світового ринку. Представлені тут результати базуються на цьому аналізі та узагальненні власного досвіду.

Результати. У цій статті пояснюється цінність активів інтелектуальної власності в контексті інноваційних продуктів та описуються основні типи прав інтелектуальної власності, які можуть бути використані для захисту цих активів.

Висновки. Добре розуміння відмінностей (предмет захисту, вимоги до реєстрації, терміни тощо) між типами інтелектуальної власності прав та їх особливостей застосування до відмінних ознак продукції, дозволяє вибрати найбільш оптимальний захист з існуючого "набору інструментів" для даної інновації. Також наведено декілька прикладів інновацій Філіпсу в галузі побутової електроніки та медицини, щоб проілюструвати різні стратегії створення оптимізованого захисту за допомогою певного набору прав інтелектуальної власності.

Ключові слова: інтелектуальна власність, права інтелектуальної власності, інновації.

Член організаційного комітету А. Велігура заявляє про відсутність конфлікту інтересів та невтручання в процес оцінювання цієї статті відповідно до міжнародних стандартів публікаційної етики. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The member of the Organizing committee A. Veligura declares no conflict of interest and has not interfered in the evaluation process of this article, in accordance with international publication ethics standards. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

Павло ВІРИЧ¹, канд. біол. наук, ст. наук. співроб.

ORCID ID: 0000-0002-1463-1992

e-mail: sphaenodon@ukr.net

Наталія КУЦЕВОЛ¹, д-р хім. наук, ст. наук. співроб.

ORCID ID: 0000-0002-1468-4111

e-mail: kutsevol@ukr.net

Олег ЄЩЕНКО¹, д-р фіз.-мат. наук, проф.

ORCID ID: 0000-0001-8927-5673

e-mail: oleg.yeshchenko@knu.ua

Віталій СМОКАЛ¹, канд. хім. наук, ст. наук. співроб.

ORCID ID: 0000-0001-6832-8625

e-mail: vitalii.smokal@knu.ua

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

МУЛЬТИКОМПОНЕНТНА НАНОСИСТЕМА ДЛЯ ФОТОДИНАМІЧНОЇ ПРОТИПУХЛИННОЇ ТЕРАПІЇ

Вступ. Фотодинамічна терапія – це малоінвазивний метод лікування пухлин, заснований на використанні фотосенсибілізуючих молекул (ФС), які генерують активні форми кисню (АФК) у тканинах після збудження червоним або інфрачервоним світлом.

Методи. Методами абсорбційної та фотолюмінесцентної спектроскопії визначено оптимальні концентрації компонентів, які здатні посилювати утворення АФК.

Результати. Було отримано та випробувано фотосистему третього покоління з покращеними фотосенсибілізуючими властивостями. Вона являє собою багатокомпонентну наносистему полімер / наночастинки золота / темпорфін. Динамічне світлорозсіювання підтверджує нівелювання агрегаційних процесів у водних розчинах порівняно з індивідуальним темпорфіном.

Висновки. Доведено, що комбінація темпорфіну з наночастинками золота, інкорпорованими в полімерну матрицю, може значно посилити ефект генерації АФК за рахунок поверхневого плазмонного резонансу наночастинок золота. Потрібна наносистема може бути рекомендована для тестування *in vitro* на ракових клітинах при опроміненні світлом малої потужності ($\lambda = 660$ нм) з метою подальшого використання у фотодинамічній терапії.

Ключові слова: полімерний наноносій, наносистема, наночастинки золота, темпорфін, фотодинамічна терапія.

Вступ

Фотодинамічна терапія (ФДТ) – сучасний, малоінвазивний, перспективний метод лікування для широкого спектра онкологічних захворювань (Niculescu, & Grumezescu, 2021, р. 3626). ФДТ заснована на взаємодії світла та фотосенсибілізатора (ФС), що призводить до утворення цитотоксичних АФК, які пошкоджують ракові клітини, ініціюючи апоптоз, некроз або аутофагію (Correia et al., 2021, р. 1332). ФДТ має перевагу над класичними методами

© Вірич Павло, Куцевол Наталія, Єщенко Олег, Смокал Віталій, 2024

хіміотерапії в онкології внаслідок зменшення побічних ефектів на здорові тканини (Correia et al., 2021, p. 1332). Основним обмеженням використання ФС у лікуванні раку є їх невибіркове накопичення в нецільових тканинах, низька стабільність, схильність до агрегації у водних розчинах і темнова цитотоксичність (Correia et al., 2021, p. 1332). На разі однією з основних вимог до систем, які використовуються у ФДТ, є селективна акумуляція в тканинах-мішенях та максимуми оптичного поглинання в діапазоні фототерапевтичного вікна (650–850 нм), а також метаболізація до нетоксичних продуктів на виведення їх з організму (Hamidi et al., 2020, p. 411). Стратегія інкапсуляції та застосування наноносіїв дозволяє покращити біосумісність та селективність систем ФДТ, а також посилити фототерапевтичні ефекти (Li, Lee, & Yoon 2018, p. 1174). Такі підходи також покращують стабільність і гідрофільність нанопрепаратів, зменшують побічні ефекти, допомагають підтримувати постійну швидкість доставки ФС, забезпечують цільову доставку ліків до пухлинних клітин і обмежують темнову токсичність (Setaro et al., 2022, p. 282; Gualdesi et al., 2021, p. 108856).

У цьому дослідженні ми синтезували трикомпонентний наноккомпозит на основі зіркоподібного полімерного наноносія з інкапсульованими наночастинки золота (Au НЧ), і ФС темопорфіном. Темопорфін є однією з небагатьох молекул ФС, схвалених для медичних випробувань у кількох європейських країнах (Baskaran, Lee, & Yang, 2018, p. 25). У роботі досліджено оптичні властивості наносистеми та розглянуто механізми посилення фотоефектів при ФДТ.

Методи

Усі хімічні речовини для синтезу полімерних наноносіїв і металовмісних полімерних наносистем були придбані в Merck (Мюнхен, Німеччина) і використані без додаткового очищення.

Полімерний наноносій. Зіркоподібний кополімер Декстран-ко-Поліакриламід в аніонній формі (Д-g-ПААан) використовували як наноносій і матрицю для приготування наносистеми. Д-g-ПАА в неіонній формі був синтезований методом радикальної прищепленої кополімеризації (Kutsevol et al., 2012, p. 82). Молекулярні параметри кополімеру, визначені методом гел-проникної хроматографії: $M_w = 2,15 \cdot 10^6$ г/моль, $R_z = 85$ нм, $M_w/M_n = 1,72$. Потім зразок Д-g-ПАА омилювали для отримання кополімеру в аніонній формі, ступінь перетворення амідних груп у карбоксилатні за 30 хв гідролізу становив 36 % (Kutsevol et al., 2014, p. 12).

Приготування наносистеми. Д-g-ПААан / AuНЧ: 1 г Д-g-ПААан протягом 20 хв. Потім додавали 0,4 мл 0,1 М NaBH_4 і перемішували ще 20 хв. Темопорфін / Д-g-ПААан / AuНЧ: розчин темопорфіну в ДМСО ($C = 0,003$ мг/мл) додавали до вихідного розчину Д-g-ПААан / AuНЧ для отримання бажаних концентрацій і перемішували 20 хв. Процедура проводили безпосередньо перед дослідженням наносистем.

Розмірні характеристики. Дослідження зразків методом динамічного розсіювання світла (ДРС) проводили за допомогою аналізатора розміру частинок NanoBrook Omni (Brookhaven Instruments, США), оснащеного

лазером 532 нм. Розсіяне світло вимірювали під кутом 173° (зворотне розсіювання). Зразки витримували за 25°C упродовж 5 хв перед вимірюванням для досягнення рівноваги. П'ятнадцять кореляційних кривих для кожного зразка були оброблені алгоритмом регуляризованого сингулярного розкладу. У результаті отримано гідродинамічний розподіл частинок за розмірами досліджуваних контрольних зразків та наносистем різного складу.

Оптичні характеристики. Спектри поглинання та фотолюмінесценції (ФЛ) вимірювали на спектрофотометрі Cary 60 UV-VIS (Agilent Technologies Inc.) та спектрофлуорофотометрі Shimadzu RF-6000 (Shimadzu Corp.), відповідно. ФЛ збуджувалася довжиною хвилі 423 нм. Спектри вимірювали за кімнатної температури впродовж 2 год після змішування розчину темопорфіну в ДМСО з водою та водними розчинами Д-g-ПААан і Д-g-ПААан / AuНЧ із 15-хвилинними інтервалами.

Вивчення генерації АФК *in situ*. Зразки темопорфіну (7,2 мкг/мл), Д-g-ПААан / AuНЧ (72 мкг/мл) і Д-g-ПААан / AuНЧ / темопорфіну (7,2 мкг/мл темопорфіну + 72 мкг/мл Д-g-ПААан / AuНЧ) готували у фізіологічному розчині. АФК вимірювали за допомогою модифікованого методу Daliang (Daliang et al., 2021, p. 129878). Далі 3 мл кожного розчину додавали до 2',7'-дихлорофлуоресцеїну (Sigma, США) для виявлення АФК. Кінцева концентрація дихлорофлуоресцеїну становила 15×10^{-6} М. Розчини опромінювали світлом $\lambda = 660$ нм (100 мДж/с), доза опромінення 30 Дж/мл. Вимірювання флуоресценції проводили відразу після закінчення опромінення світлом. Використовували спектрофлуорофотометр Shimadzu RF-6000 із програмним забезпеченням LabSolutions. Флуоресценцію реєстрували за 525 нм зі збудженням 488 нм. Флуоресценцію зразків оцінювали в умовних одиницях. Під час експерименту всі зразки перебували в однакових умовах. Повторність досліджень була шестикратною.

Результати

AuНЧ були синтезовані в полімерній матриці (Chumachenko et al., 2016, p. 379). Цей метод синтезу дозволяє точно контролювати діаметр НЧ і їхній розподіл за розмірами. До утвореної наносистеми додавали фотосенсибілізатор темопорфін безпосередньо перед тестуванням. У розчині темопорфіну, який готували додаванням у воду розчину темопорфіну в ДМСО, чітко видно утворення агрегатів з радіусами 145 нм і приблизно 10 мкм (рис. 1а, пунктирна лінія) унаслідок поганого розчинення темопорфіну у воді.

Розподіл наночастинок за розмірами для кон'югатів темопорфін / Д-g-ПААан і темопорфін / Д-g-ПААан / AuНЧ показує зникнення агрегатів темопорфіну, які були в розчині темопорфіну без полімеру (рис. 1 а-б). Розподіл розмірів систем темопорфін / Д-g-ПААан і Д-g-ПААан / AuНPs / темопорфін нагадує характерну криву розподілу незаряджених полімерів. Цей ефект є результатом взаємодії поліелектроліт–темопорфін. AuНЧ не відіграють істотної ролі в цьому процесі. Радіуси кон'югатів темопорфін / Д-g-ПААан і темопорфін / Д-g-ПААан / AuНЧ становлять 110 нм і 90 нм, відповідно.

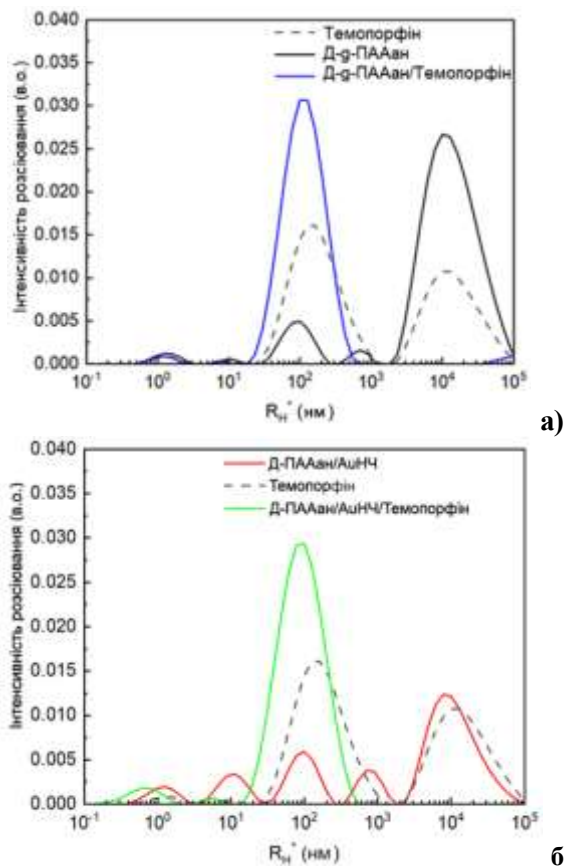


Рис. 1. Розподіл частинок за розміром, отриманий за допомогою ДРС для наногібридних систем Д-г-ПААн:

- а) бінарна система темопорфін / Д-г-ПААн і контрольні зразки:
Д-г-ПАА; темопорфін;
б) темопорфін / Д-г-ПААн / АуНЧ та контрольні зразки:
Д-г-ПАА / АуНЧ; темопорфін

Спектри фотолюмінесценції (ФЛ) темопорфіну у воді, наносистем темопорфін / Д-г-ПААн і темопорфін / Д-г-ПААн / АуНЧ представлено на (рис. 2). Спектр темопорфіну у воді має структуру, типову для порфіринів (Aslanoglu et al., 2020, p. 16956; Gierlich et al., 2021, p. e20210024). У спектрі спостерігаються два піки: короткохвильовий (653 nm) і довгохвильовий (715 nm). Ці піки відповідають переходам $S1(0) \rightarrow S0(0)$ і $S1(0) \rightarrow S0(1)$ від основного коливального рівня 1-го збудженого π -електронного стану до основного та 1-го збудженого коливального рівня основного π -електронного стану молекули ФС, відповідно. Інтенсивність піку за 615 nm чистого темопорфіну досить низька, але зростає, коли темопорфін зв'язується з полімером. Це є додатковим аргументом на користь нашого висновку про зв'язування молекул темопорфіну з полімером.

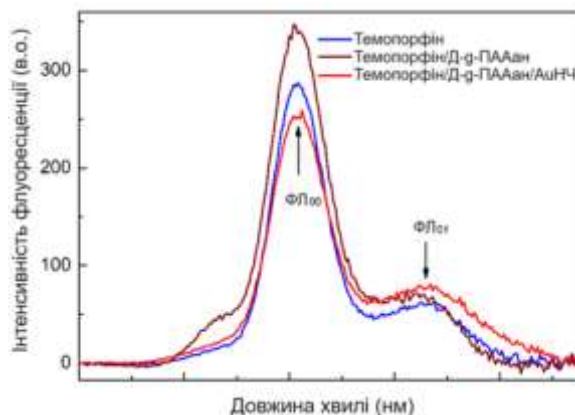


Рис. 2. Спектри ФЛ темопорфіну у воді та водних розчинах темопорфін / Д-г-ПААан і темопорфін / Д-г-ПААан / AuNC при збудженні 423 нм. Концентрації компонентів: темопорфін – 0,72 мкг/мл, золото і полімер – 7,2 мкг/мл

Проведено дослідження генерації АФК в умовах опромінення наносистеми Д-г-ПААан / AuNC/ темопорфін та контрольних систем світловим опромінення, як при ФДТ ($\lambda = 660$ нм) (Zhou et al., 2016, p. 6597). Не було виявлено жодних статистично значущих відмінностей у рівнях АФК після опромінення світлом 660 нм контрольних розчинів (фізіологічний розчин та Д-г-ПААан / AuNC) (рис. 3). Рівні АФК зросли в ~ 3 рази для розчину темопорфіну та ~ 5 разів для потрійного нанокompозиту Д-г-ПААан / AuNC/ темопорфін порівняно з контрольними зразками.

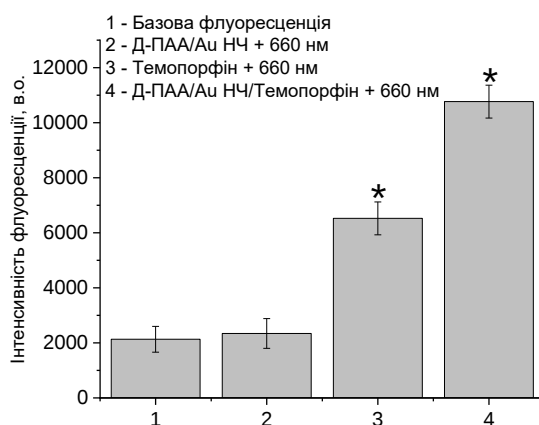


Рис. 3. Рівень АФК для фізіологічного розчину (контроль), Д-г-ПААан / AuNCs (72 мкг/мл), темопорфіну (7,2 мкг/мл) і Д-г-ПААан / AuNC / темопорфін (72 мкг/мл Д-г-ПААан / AuNC, 7,2 мкг/мл темопорфін) після опромінення світлом 660 нм ($M \pm SD$; $n = 6$, тест Краскела–Уолліса, $*p < 0,05$)

Отримані результати підтверджують фотодисоціацію темопорфіну та утворення вільних радикалів після опромінення світлом 660 нм. Інкапсуляція AuНЧ і темопорфіну в полімерній матриці Д-g-ПААан посилює утворення АФК.

Дискусія і висновки

Показано ефективність потрійної системи, що містить зіркоподібний полімер декстран-поліакриламід з інкорпорованим темопорфіном і наночастинками золота для генерації активних форм кисню при збудженні червоним світлом ($\lambda = 660$ нм). Дослідження оптичних властивостей і наявності агрегаційних процесів у наносистемі методами динамічного розсіювання світла та спектроскопії поглинання / емісії дозволили виявити особливості механізму збудження та оптимізувати склад наносистеми для досягнення максимальної ефективності при використанні ФДТ. Показано, полімерна матриця стабілізує наносистему та попереджає агрегацію, а також сприяє взаємодії між фотосенсибілізатором і наночастинками де відбувається обмін енергією зі збільшенням генерації АФК. Розроблена система готова для досліджень *in vitro* в умовах ФДТ відносно клітин раку.

Внесок авторів: Павло Вірич – дослідження генерації АФК, аналіз одержаних даних; Наталія Куцевол – валідація даних, концептуалізація, методологія; Олег Ещенко – спектроскопічні дослідження, написання – перегляд і редагування; Віталій Смокал – написання – перегляд і редагування.

Подяки, джерела фінансування. Цю роботу виконано в рамках проєкту Міністерства освіти і науки України "Полімерні системи та нанокompозити для оптоелектроніки" (№ 0124U001177).

Список використаних джерел

- Aslanoglu, B. et al. (2020). Optical properties of photodynamic therapy drugs in different environments: The paradigmatic case of temoporfin. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 22, 16956–16964. <https://doi.org/10.1039/D0CP02055A>
- Baskaran, R., Lee, J., & Yang, S.-G. (2018). Clinical development of photodynamic agents and therapeutic applications. *Biomater. Res.*, 22, 25. <https://doi.org/10.1186/s40824-018-0140-z>
- Correia, J.H., Rodrigues, J.A., Pimenta, S., Dong, T., & Yang, Z. (2021). Photodynamic Therapy Review: Principles, Photosensitizers, Applications, and Future Directions. *Pharmaceutics*, 13, 1332. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13091332>
- Chumachenko, V.A. et al. (2016). Copolymers Dex-tran-Graft-Polyacrylamide as Nanocarriers for Delivery of Gold Nanoparticles and Photosensitizers to Tumor Cells. In Nano-physics, Nanophotonics, Surface Studies, and Applications. *Springer*, 183, 379–390. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30737-4_32
- Daliang, Y. et al. (2021). Improved detection of reactive oxygen species by DCFH-DA: New insight into self-amplification of fluorescence signal by light irradiation. *Sens. Actuators B. Chem.*, 339, 129878. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.129878>
- Gierlich, P. et al. (2021). One-photon and two-photon photophysical properties of tetrafunctionalized Temoporfin (mTHPC) derivatives as potential agents for two-photon induced photodynamic therapy. *ChemPhotoChem*, 6(4), e202100249. <https://doi.org/10.1002/cptc.202100249>
- Gualdesi, M.S. et al. (2021). New poly(acrylamide) nanoparticles in the development of third generation photosensitizers. *Dye. Pigment.*, 184, 108856. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2020.108856>
- Hamidi, A., Shamlouei, H.R., Maleki, A., & Goodajdar, B.M. (2020). Improving the Optical Properties of Porphyrin Ring with Different Substitutions: As Candidate Using in Photosensitizer. *Int. J. Nanoelectron. Mater.*, 13, 411–420.
- Kutsevol, N., Bezugla, T., Bezuglyi, M., & Rawiso, M. (2012). Branched Dextran-graft-Polyacrylamide Copolymers as Perspective Materials for Nanotechnology. *Macromol. Symp.*, 317, 82–90. <https://doi.org/10.1002/masy.201100087>

Kutsevol, N., Bezuglyi, M., Rawiso, M., & Bezugla, T. (2014). Star-like Dextran-graft-(polyacrylamide-co-polyacrylic acid) Copolymers. *Macromol. Symp.*, 335, 12–16. <https://doi.org/10.1002/masy.201200115>

Li, X., Lee, S., & Yoon, J. (2018). Supramolecular photosensitizers rejuvenate photodynamic therapy. *Chem. Soc. Rev.*, 47, 1174–1188. <https://doi.org/10.1039/C7CS00594F>

Niculescu A.G., & Grumezescu, A.M. (2021). Photodynamic Therapy – An Up-to-Date Review. *Appl. Sci.*, 11, 3626. <https://doi.org/10.3390/app11083626>

Setaro, F. et al. (2020). Amphiphilic phthalocyanines in polymeric micelles: A supramolecular approach toward efficient third-generation photosensitizers. *J. Mater. Chem. B.*, 8, 282–289. <https://doi.org/10.1039/C9TB02014D>

Zhou, Z., Song, J., Nie, L., & Chen, X. (2016). Reactive oxygen species generating systems meeting challenges of photodynamic cancer therapy. *Chem. Soc. Rev.*, 45, 6597–6626. <https://doi.org/10.1039/c6cs00271d>

References

Aslanoglu, B. et al. (2020). Optical properties of photodynamic therapy drugs in different environments: The paradigmatic case of temoporfin. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 22, 16956–16964. <https://doi.org/10.1039/D0CP02055A>

Baskaran, R., Lee, J., & Yang, S.-G. (2018). Clinical development of photodynamic agents and therapeutic applications. *Biomater. Res.*, 22, 25. <https://doi.org/10.1186/s40824-018-0140-z>

Correia, J.H., Rodrigues, J.A., Pimenta, S., Dong, T., & Yang, Z. (2021). Photodynamic Therapy Review: Principles, Photosensitizers, Applications, and Future Directions. *Pharmaceutics*, 13, 1332. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13091332>

Chumachenko, V.A. et al. (2016). Copolymers Dex-tran-Graft-Polyacrylamide as Nanocarriers for Delivery of Gold Nanoparticles and Photosensitizers to Tumor Cells. In Nano-physics, Nanophotonics, Surface Studies, and Applications. *Springer*, 183, 379–390. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30737-4_32

Daliang, Y. et al. (2021). Improved detection of reactive oxygen species by DCFH-DA: New insight into self-amplification of fluorescence signal by light irradiation. *Sens. Actuators B. Chem.*, 339, 129878. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.129878>

Gierlich, P. et al. (2021). One-photon and two-photon photophysical properties of tetrafunctionalized Temoporfin (mTHPC) derivatives as potential agents for two-photon induced photodynamic therapy. *ChemPhotoChem*, 6(4), e20210024. <https://doi.org/10.1002/cptc.202100249>

Gualdesi, M.S. et al. (2021). New poly(acrylamide) nanoparticles in the development of third generation photosensitizers. *Dye. Pigment.*, 184, 108856. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2020.108856>

Hamidi, A., Shamlouei, H.R., Maleki, A., & Goodajdar, B.M. (2020). Improving the Optical Properties of Porphyrin Ring with Different Substitutions: As Candidate Using in Photosensitizer. *Int. J. Nanoelectron. Mater.*, 13, 411–420.

Kutsevol, N., Bezugla, T., Bezuglyi, M., & Rawiso, M. (2012). Branched Dextran-graft-Polyacrylamide Copolymers as Perspective Materials for Nanotechnology. *Macromol. Symp.*, 317, 82–90. <https://doi.org/10.1002/masy.201100087>

Kutsevol, N., Bezuglyi, M., Rawiso, M., & Bezugla, T. (2014). Star-like Dextran-graft-(polyacrylamide-co-polyacrylic acid) Copolymers. *Macromol. Symp.*, 335, 12–16. <https://doi.org/10.1002/masy.201200115>

Li, X., Lee, S., & Yoon, J. (2018). Supramolecular photosensitizers rejuvenate photodynamic therapy. *Chem. Soc. Rev.*, 47, 1174–1188. <https://doi.org/10.1039/C7CS00594F>

Niculescu, A.G., & Grumezescu, A.M. (2021). Photodynamic Therapy—An Up-to-Date Review. *Appl. Sci.*, 11, 3626. <https://doi.org/10.3390/app11083626>

Setaro, F. et al. (2020). Amphiphilic phthalocyanines in polymeric micelles: A supramolecular approach toward efficient third-generation photosensitizers. *J. Mater. Chem. B.*, 8, 282–289. <https://doi.org/10.1039/C9TB02014D>

Zhou, Z., Song, J., Nie, L., & Chen, X. (2016). Reactive oxygen species generating systems meeting challenges of photodynamic cancer therapy. *Chem. Soc. Rev.*, 45, 6597–6626. <https://doi.org/10.1039/c6cs00271d>

Отримано редакцією збірника / Received: 21.06.24

Прорецензовано / Revised: 11.07.24

Схвалено до друку / Accepted: 30.09.24

Pavlo VIRYCH¹, PhD (Biol.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0002-1463-1992
e-mail: sphaenodon@ukr.net

Nataliya KUTSEVOL¹, DSc (Chem.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0002-1468-4111
e-mail: kutsevol@ukr.net

Oleg YESHCENKO¹, DSc (Phys. & Math.), Prof.
ORCID ID: 0000-0001-8927-5673
e-mail: oleg.yeshchenko@knu.ua

Vitalii SMOKAL¹, PhD (Chem.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0001-6832-8625
e-mail: vitalii.smokal@knu.ua

¹Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

MULTICOMPONENT NANOSYSTEM FOR PHOTODYNAMIC ANTI-TUMOR THERAPY

Introduction. *Photodynamic therapy is a minimally invasive method of treating tumors based on photosensitizing molecules (PS) that generate reactive oxygen species (ROS) in tissue under the influence of red or infrared light excitation.*

Methods. *The optimum concentrations of components that can enhance the formation of (ROS) were determined by absorption and photoluminescence spectroscopy.*

Results. *In this work a third-generation FS with improved photosensitizing properties was prepared and studied. This FS is a multicomponent nanosystem polymer-gold nanoparticles-temoporfin. Dynamic light scattering confirm the leveling of aggregation processes in comparison with individual temoporfin.*

Conclusions. *It has been proven that the combination of temporphine with gold nanoparticles incorporated into a polymer matrix can significantly enhance the effect of ROS generation due to the surface plasmon resonance of gold nanoparticles. The ternary nanosystem can be recommended for in vitro testing on cancer cells under low-power LED lamp irradiation ($\lambda = 660$ nm) for further use in photodynamic therapy.*

Keywords: *polymer nanocarrier; nanosystem; gold nanoparticles; temoporfin; photodynamic therapy.*

Автори П. Вірич, О. Єщенко та В. Смокал заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Член редакційної колегії Н. Кутсевол заявляє про відсутність конфлікту інтересів та невтручання в процес оцінювання цієї статті відповідно до міжнародних стандартів публікаційної етики. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors P. Virych, O. Yeshchenko and V. Smokal declare no conflicts of interest. The member of the Editorial board N. Kutsevol declares no conflict of interest and has not interfered in the evaluation process of this article, in accordance with international publication ethics standards. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

Валерій Б. ОРЕЛ^{1,2}, асп.
ORCID ID: 0000-0003-3653-0823
e-mail: orel.valeriy@gmail.com

Анатолій ДЄДКОВ¹, д-р мед. наук, проф., голов. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0002-2187-0502
e-mail: an.dedkov@gmail.com

Валерій Е. ОРЕЛ^{1,2}, д-р біол. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0002-6319-4215
e-mail: valeriioREL@gmail.com

Ольга ДАСЮКЕВИЧ¹, канд. біол. наук, провід. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0002-5042-3541
e-mail: olgadix1993@gmail.com

Олександр РИХАЛЬСЬКИЙ¹, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0001-6319-7316
e-mail: a.rykhalskiy@gmail.com

¹Державне некомерційне підприємство "Національний інститут раку",
Київ, Україна,

² НТУУ "КПІ імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ІНДУКЦІЙНОЇ ПОМІРНОЇ ГІПЕРТЕРМІЇ НА ГЕТЕРОГЕННІСТЬ МРТ-ЗОБРАЖЕНЬ САРКОМИ-45

Вступ. Індукційна помірна гіпертермія (ІПГ) злоякісних пухлин передбачає використання радіочастот для вибіркової локальної дії теплових і нетеплових ефектів у зоні пухлини. Метою роботи було вивчення впливу локальної індукційної помірної гіпертермії (ІПГ) на гетерогенність (ГТ) різних зон інтересу саркоми-45 за допомогою текстурного аналізу МРТ-зображень.

Методи. Дослідження експериментального пухлинного процесу проводилось на неінbredних самках щурів (ДНП "НІР", Київ) з саркомою-45. Проведене комп'ютерне планування параметрів ІПГ різних зон інтересу пухлини з використанням програмного забезпечення Comsol Multiphysics v. 5.6 (COMSOL AB, Stockholm) засвідчило, що середнє значення питомого коефіцієнта поглинання електромагнітної енергії у центрі пухлини (3,6 Вт/кг) було вищим, ніж на периферії (3,3 Вт/кг) чи у капсулі (2,3 Вт/кг).

Результати. Під впливом ІПГ, ініційованої апаратом "Магнітерм" (Радмір, Україна), на 24 добу після перещеплення пухлини спостерігалось істотне зменшення об'єму саркоми-45.

Висновки. Порівняльний аналіз ГТ за індексом Морана зон інтересу на T1-зважених МРТ-зображеннях показав, що ІПГ знижує даний текстурний параметр у всіх досліджених зонах інтересу саркоми-45 у середньому на 21 % порівняно з контрольною групою тварин без впливу. Найбільш імовірно ефект збільшення ГТ саркоми-45 був пов'язаний з більш вираженим формуванням фіброзної капсули та деструкції центра і периферії пухлини у відповідь на ІПГ.

Ключові слова: індукційна помірна гіпертермія, саркома-45, комп'ютерний аналіз, МРТ-зображення, гетерогенність, індекс Морана.

© Орел Валерій Б., Дедков Анатолій, Орел Валерій Е.,
Дасюкевич Ольга, Рихальський Олександр, 2024

Вступ

Індукційна помірна гіпертермія (ІПГ) злоякісних пухлин передбачає використання радіочастот для вибіркової локальної дії теплових і нетеплових ефектів у зоні пухлини. ІПГ виникає як з електричної, так і з магнітної складової прикладеного поля (Barnes, & Greenebaum, 2018, p. 165–170).

Саркоми – це гетерогенна група злоякісних пухлини, які виникають із сполучних тканин, що обумовлено аберантними генетичними, сигнальними, метаболічними, морфологічними та гемодинамічними характеристиками. ІПГ зменшує просторову гетерогенність (ГТ) експресії проапоптичного білка Вах у клітинах саркоми Saos-2 (Orel et al., 2024, p. 1–18).

Мета роботи – вивчення впливу ІПГ на ГТ саркоми-45 за допомогою комп'ютерного аналізу МРТ-зображень.

Методи

Дослідження експериментального пухлинного процесу проводилось на неінbredних самках щурів (ДНП "НІР", Київ) з саркомою-45. Тварин поділили на 3 групи: 1 – інтактні щури ($n = 6$); 2 – контрольна група із саркомою-45 ($n = 6$) без лікування ІПГ; 3 – експериментальна група з саркомою-45, яка піддавалася впливу ІПГ ($n = 6$). Для реалізації локального впливу ІПГ на саркому-45 використовували експериментальний зразок апарата "Магнітерм" (Радмір, Україна) з дипольним аплікатором. Процедура опромінення частотою 42 МГц проводили, починаючи з другого дня після перещеплення пухлини. Усього було проведено по 5 сеансів по 15 хв ІПГ через день. Підвищення температури під час сеансів лікування становило не більше 4 °С. Дослідження на тваринах проводили відповідно до Закону України N 3447-IV про захист тварин від жорстокого поводження та Європейської Директиви 2010/63/ЄС про захист тварин, які використовуються в наукових цілях.

Комп'ютерне планування ІПГ було проведено з використанням програмного забезпечення Comsol Multiphysics v. 5.6 (COMSOL AB, Stockholm). Слід зауважити, що розподіл електромагнітного поля в пухлині нерівномірний. У табл. 1 наведено середні значення питомого коефіцієнта поглинання електромагнітної енергії за результатами комп'ютерного моделювання для різних зон інтересу саркоми-45.

Таблиця 1

Середні значення питомого коефіцієнта поглинання електромагнітної енергії в моделі для різних зон інтересу

Параметр	Зона інтересу		
	Центр пухлини	Периферія пухлини	Капсула пухлини
Питомий коефіцієнт поглинання електромагнітної енергії, Вт/кг	3,6	3,3	2,3

Магнітно-резонансну томографічну (МРТ) візуалізацію проводили під час індукції постійного магнітного поля 1,5 Т та частоті 63,9 МГц (Intera, Philips, Нідерланди), використовуючи 8-канальну колінну котушку (Sense Knee Coil, Philips). Зони інтересу "центр пухлини", "периферія пухлини" та "капсула пухлини" сегментовано у програмному середовищі ImageJ 1.53a (National Institutes of Health, США). Для оцінювання ГТ МРТ-зображень пухлини використовували індекс просторової автокореляції Морана у продукті Autocorrelation v. 1.0 (НІР, Україна).

Статистичний аналіз достовірності отриманих даних проводили за допомогою U-критерію Манна–Уїтні для порівняння об'єму пухлин та критерію Краскела–Уолліса – для порівняння значень індексу Морана у пакеті SPSS Statistics 25 (IBM Corp.).

Результати

Зміни об'єму саркоми-45 під впливом ІПГ на 24-ту добу після перещеплення пухлини наведено в табл. 2. Таке істотне зменшення об'єму пухлини після курсу ІПГ найбільш імовірно пов'язане з дією електромагнітного опромінення на ранній стадії росту експериментальної пухлини, коли ще не сформована судинна мережа (Carmeliet, & Jain, 2000, p. 249–257).

Таблиця 2

Зміна об'єму саркоми-45 під впливом ІПГ
на 24 добу після перещеплення пухлини, $M \pm m$

Група	Об'єм, см ³
Контроль ($n = 6$)	$17,4 \pm 2,2$
ІПГ ($n = 6$)	$3,1 \pm 1,9^*$

* статистично достовірна різниця від контролю, $p < 0,05$.

Рис. 1 демонструє приклад сегментації T_1 -зважених МРТ зображень (коронарні зрізи) тварин із саркомою-45. Пухлини візуалізувались ізогіпоінтенсивними утвореннями, овоїдної форми з бугристими контурами, наявністю ділянок центрального некрозу у контрольній групі, у той час як в експериментальній групі вони мали більш рівні контури, виражені ділянки некрозу та більш виражену капсулу. Візуальний аналіз МРТ зрізів достатньо інформативно відображає типовий індивідуальний протипухлинний ефект впливу курсу ІПГ на 24 добу після перещеплення пухлини. Однак, звичайно, помітна різниця в розмірах та візуальних характеристиках саркоми-45 недостатня. Для більш повного розуміння особливостей зміни ГТ пухлин під впливом ІПГ було проведено розрахунки індексу Морана для зон інтересу на отриманих МРТ-зображеннях саркоми-45, результати яких наведено в табл. 3.

Проаналізувавши вищенаведені результати кількісного оцінювання ГТ, слід зазначити, що в контрольній групі тварин показники ГТ у різних зонах інтересу мали неоднакові значення. У відповідь на ІПГ розрахований текстурний параметр істотно знижувався в середньому на 21 % для всіх зон інтересу

порівняно з контролем. Найменші значення індексу Морана були в зоні інтересу капсули після ІПГ. За даними (Miallot et al., 2021, с. 1–23), найбільш імовірно зміна ГТ зон інтересу на T_1 -зважених МРТ-зображеннях саркоми-45 була пов'язана зі зменшенням варіації щільності тканин, їхнього мікрооточення та позитивними змінами кровотоку у пухлинах під впливом ІПГ.

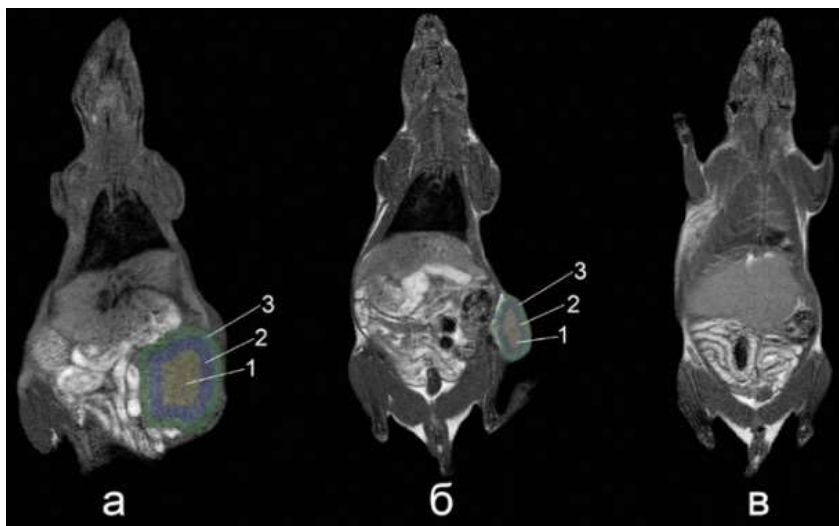


Рис. 1. T_1 -зважені МРТ-зображення (коронарний зріз): контрольна група із саркомою-45 без впливу (а); експериментальна група з саркомою-45 після впливу ІПГ (б); інтактні тварини без пухлини (в).
Зона інтересу пухлини: 1 – центр; 2 – периферія; 3 – капсула

Таблиця 3

Порівняння індексу Морана зон інтересу на T_1 -зважених МРТ-зображеннях пухлиноносіїв саркоми 45, $M \pm m$

Група	Зона інтересу		
	Центр пухлини, у.о.	Периферія пухлини, у.о.	Капсула пухлини, у.о.
Контроль	$0,75 \pm 0,003$	$0,67 \pm 0,003^*$	$0,56 \pm 0,005^{*\S}$
ІПГ	$0,51 \pm 0,008^a$	$0,56 \pm 0,006^a$	$0,48 \pm 0,006^{*\S a}$
М'язова тканина здорової кінцівки	$0,69 \pm 0,006^{ab}$		

* статистично достовірна різниця від зони інтересу "центр пухлини", $p < 0,05$;

§ статистично достовірна різниця від зони інтересу "периферія пухлини", $p < 0,05$;

^a статистично достовірна різниця від контролю, $p < 0,05$;

^b статистично достовірна різниця від ІПГ, $p < 0,05$.

Дискусія і висновки

Локальна індукційна помірна гіпертермія саркоми-45 ініціює підвищення гетерогенності пухлини на T_1 -зважених МРТ-зображеннях порівняно з візуалізованими контрольними пухлинами тварин без впливу. Отримані результати можуть мати практичне значення для характеристики пухлин під час діагностики та оцінюванні ефекту лікування хворих на саркоми.

Внесок авторів: Валерій Б. Орел – концептуалізація, методологія, формальний аналіз, програмне забезпечення, написання – оригінальна чернетка, написання – перегляд і редагування; Анатолій Дедков – методологія, концептуалізація; Валерій Е. Орел – концептуалізація, валідація, написання – оригінальна чернетка, написання – перегляд і редагування; Ольга Дасюкевич – методологія; Олександр Рихальський – методологія, програмне забезпечення, написання – перегляд і редагування.

Подяки, джерела фінансування. Автори висловлюють подяку К.С. Матвейчук за технічну підтримку. Роботу виконано за часткової фінансової підтримки МОЗ України НДР ВН.14.01.07.204-23.

Список використаних джерел

Barnes, F., & Greenebaum, B. (2018). Role of radical pairs and feedback in weak radio frequency field effects on biological systems. *Environmental Research*, 163, 165–170. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.01.038>

Carmeliet P., & Jain R. (2000). Angiogenesis in cancer and other diseases. *Nature*, 407, 249–257. <https://doi.org/10.1038/35025220>

Miallot, R., Galland, F., Millet, V., Blay, J., & Naquet, P. (2021). Metabolic landscapes in sarcomas. *Journal of Hematology & Oncology*, 14, 114. <https://doi.org/10.1186/s13045-021-01125-y>

Orel, V., Diedkov, A., Ostafiichuk, V., Lykhova, O., Kolesnyk, D., Orel, V., Dasyukevich, O., Rykhalskyi, O., Diedkov, S., & Prosvietova, A. (2024). Combination treatment with liposomal doxorubicin and inductive moderate hyperthermia for sarcoma Saos-2 cells. *Pharmaceuticals*, 17, 133. <https://doi.org/10.3390/ph17010133>

References

Barnes, F., & Greenebaum, B. (2018). Role of radical pairs and feedback in weak radio frequency field effects on biological systems. *Environmental Research*, 163, 165–170. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.01.038>

Carmeliet P., & Jain R. (2000). Angiogenesis in cancer and other diseases. *Nature*, 407, 249–257. <https://doi.org/10.1038/35025220>

Miallot, R., Galland, F., Millet, V., Blay, J., & Naquet, P. (2021). Metabolic landscapes in sarcomas. *Journal of Hematology & Oncology*, 14, 114. <https://doi.org/10.1186/s13045-021-01125-y>

Orel, V., Diedkov, A., Ostafiichuk, V., Lykhova, O., Kolesnyk, D., Orel, V., Dasyukevich, O., Rykhalskyi, O., Diedkov, S., & Prosvietova, A. (2024). Combination treatment with liposomal doxorubicin and inductive moderate hyperthermia for sarcoma Saos-2 cells. *Pharmaceuticals*, 17, 133. <https://doi.org/10.3390/ph17010133>

Отримано редакцією збірника / Received: 26.06.24

Прорецензовано / Revised: 12.07.24

Схвалено до друку / Accepted: 30.09.24

Valerii B. OREL^{1,2}, PhD Student
ORCID ID: 0000-0003-3653-0823
e-mail: orel.valeriy@gmail.com

Anatolii DIEDKOV¹, DSc (Med.), Prof., Principal Researcher
ORCID ID: 0000-0002-2187-0502
e-mail: an.dedkov@gmail.com

Valerii E. OREL^{1,2}, DSc (Biol.), Prof.
ORCID ID: 0000-0002-6319-4215
e-mail: valeriiorel@gmail.com

Olga DASYUKEVICH¹, PhD (Biol.), Leading Researcher
ORCID ID: 0000-0002-5042-3541
e-mail: olgadix1993@gmail.com

Oleksandr RYKHALSKIY¹, Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0001-6519-7316
e-mail: a.rykhalskiy@gmail.com

¹National Cancer Institute of Ukraine, Kyiv, Ukraine,

²National Technical University of Ukraine, "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

EXAMINATION OF THE EFFECT OF INDUCTIVE MODERATE HYPERTHERMIA ON SARCOMA-45 HETEROGENEITY USING MAGNETIC RESONANCE IMAGING

Introduction. *Induced moderate hyperthermia (IMH) of malignant tumors involves the use of radio frequencies for selective local action of thermal and non-thermal effects in the tumor area. The current work aims to evaluate the effect of local inductive moderate hyperthermia (IMH) on the heterogeneity of different regions of interest (ROIs) delineated on MRI scans of sarcoma-45 bearing animals using texture analysis.*

Methods. *The study of the experimental tumor process was conducted on non-inbred female rats (DNP "NIR", Kyiv) with sarcoma-45. Computer planning of IMH parameters for different tumor ROIs based on Comsol Multiphysics v. 5.6. (COMSOL AB, Stockholm) software revealed that the average value of the specific absorption rate was higher in the tumor core (3.6 W/kg) than in the periphery (3.3 W/kg) or capsule (2.3 W/kg).*

Results. *A significant tumor volume reduction was observed on day 24 following implantation in response to IMH delivered by a MagTherm (Radmir, Ukraine) apparatus.*

Conclusions. *Comparative analysis of ROI heterogeneity, determined by the Moran's autocorrelation index of T₁-weighted MRI scans, showed that IMH led to a 21 % decrease in the value of this texture parameter across all tumor ROIs, on average, as compared with the control group which received no treatment. The reported increase in heterogeneity of sarcoma-45 was most likely associated with a more pronounced formation of the fibrous capsule and tumor destruction in the core and periphery ROIs in response to IMH.*

Keywords: *induction moderate hyperthermia, sarcoma-45, MRI image, computer analysis, heterogeneity, Moran's index.*

Автори В.Б. Орел, А. Дедков, О. Дасюкевич та О. Рихальський заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Член редакційної колегії В.Е. Орел заявляє про відсутність конфлікту інтересів та невтручання в процес оцінювання цієї статті відповідно до міжнародних стандартів публікаційної етики. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors V.B. Orel, A. Diedkov, O. Dasyukevich and O. Rykhalskiy declare no conflicts of interest. The member of the Editorial board V.E. Orel declares no conflict of interest and has not interfered in the evaluation process of this article, in accordance with international publication ethics standards. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

Оксана НАДТОКА¹, канд. хім. наук, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0003-1868-3885
e-mail: nadтока_oksana@knu.ua

Павло ВІРИЧ¹, канд. біол. наук, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0002-1463-1992
e-mail: sphaenodon@ukr.net

Наталія КУЦЕВОЛ¹, д-р хім. наук, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0002-1468-4111
e-mail: kutsevol@ukr.net

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

АНТИБАКТЕРІАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ ГІДРОГЕЛІВ НА ОСНОВІ ПОЛІАКРИЛАМІДУ ТА ПОЛІГЕКСАМЕТИЛЕНГУАНІДИНГІДРОХЛОРИДУ

Вступ. Дослідження присвячене розробці полімерних матеріалів біомедичного призначення, яким властиві антибактеріальні властивості.

Методи. Два гідрофільних синтетичних полімери – ковалентно зшитий поліакриламід та полігексаметиленгуанідингідрохлорид, – було синтезовано методами радикальної полімеризації та поліконденсації відповідно.

Результати. У результаті обмеженого набухання зшитий поліакриламід у водному розчині утворює гідрогелі з хорошими дифузійними і сорбційними властивостями, ступінь набухання становить 1370 %. Бактерицидні властивості ПГМГХ було оцінено шляхом визначення мінімальної інгібуючої концентрації щодо штамів бактерій *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* та *Klebsiella quasipneumoniae* і показано високу активність полімеру у водному розчині за концентрацій менше 175 мкг/мл. У результаті сорбції ПГМГХ із розчинів різної концентрації на поверхню гідрогелю було отримано зразки із різним вмістом діючої речовини у зразку. Зразки ПАА-гідрогелів із ПГМГХ було протестовано диско-дифузійним методом щодо штамів указаних бактерій та було показано їхні антибактеріальні властивості.

Висновки. Таким чином, ПАА-гідрогелі з адсорбованим на їхній поверхні полігексаметиленгуанідингідрохлоридом, володіючи низькою токсичністю, біологічною деструкцією, неагресивністю до інших матеріалів та біологічних тканин, завдяки своїм антибактеріальним властивостям можуть бути використані як раневі пов'язки, що запобігають інфекційним захворюванням.

Ключові слова: гідрогелі, поліакриламід, полігексаметиленгуанідингідрохлорид, антибактеріальні властивості.

Вступ

Проблема боротьби з мікроорганізмами, що викликають інфекційні захворювання у людей та тварин, з біодеструкцією матеріалів та біообростанням обладнання є актуальною, незважаючи на значний вибір існуючих біоцидних препаратів. Більшість дезінфікуючих засобів містять токсичні речовини або

утворюють токсичні продукти деструкції. Токсичність та агресивність традиційних хлорвмісних препаратів, альдегідних та фенольних препаратів становить ризик для здоров'я людей та довкілля і є причиною необхідності розробки нових екологічно безпечних та малотоксичних засобів.

Останнім часом значну увагу приділяють дезінфікуючим засобам на основі полігуанідинів, що зумовлено їхньою біоцидною властивістю, стабільністю, низькою токсичністю. Антисептичні та дезінфікуючі засоби на основі гуанідинових сполук активні щодо грамнегативних та грампозитивних бактерій (Walczak, Richert, & Burkowska-But, 2014).

Відомі новітні стратегії дизайну біологічно активних матеріалів охоплюють значною мірою гідрогелі, пропонуючи різноманітні методи синтезу на основі полімерних сіток. Гідрогелі на основі поліакриламід (ПАА) завдяки своїм водоутримуючим властивостям, еластичності, атравматичності зарекомендували себе як високоефективні матеріали нової генерації для лікування ран (Nadtoka et al., 2019). Гідрогелі можуть містити розчини антисептиків, анальгетиків та знеболювальних, що дозволяє не тільки ізолювати рану від інфекції, а й проводити терапію ран різного генезу.

Проведене дослідження має на меті отримання та вивчення антибактеріальних властивостей гідрогелів на основі ПАА, що насичені дезінфікуючим засобом полігексаметиленгуанідингідрохлоридом (ПГМГХ), які можуть бути використані в медицині, у лікарняній практиці, у ветеринарії, у побуті тощо.

Методи

Для синтезу гідрогелю та бактерицидного полімеру використовували акриламід, N,N'-метилєн-біс-акриламід, церій(IV) амоній нітрат (ЦАН), гуанідин гідрохлорид, гексаметилендіамін (Sigma-Aldrich), дистильовану воду.

Синтез гідрогелю проводили методом радикальної полімеризації акриламід за наявності зшивного агента N,N'-метилєн-біс-акриламід, узятого в концентрації 0,4 % від маси акриламід. Як ініціатор було використано окисно-відновну систему Ce(IV)/HNO₃. Гідрогель було очищено шляхом витримування в дистильованій воді для видалення залишків реагентів. Дистильовану воду тричі на добу змінювали протягом кількох діб.

Синтез бактерицидного полімеру полігексаметиленгуанідингідрохлориду було здійснено методом поліконденсації гуанідин гідрохлориду та гексаметилендіаміну, узятих в еквімолярних кількостях у розплаві із поступовим збільшенням температури реакційної суміші від 120 до 180 °С. Полімер було очищено методом кількарязового переосадження з лужного середовища.

Проведено визначення мінімальної інгібуючої концентарції (МІК). Антибактеріальну активність ПГМГХ перевіряли щодо штамів *Staphylococcus aureus* (ATCC 29213), *Escherichia coli* (ATCC 25922), *Pseudomonas aeruginosa* (ATCC 277253) і *Klebsiella quasipneumoniae* (ATCC 700603). Дослідження проведено на рідкому середовищі Мюллера–Хінтона такого складу (г/л): гідролізат казеїну – 17,5, пептон ферментативний – 2, крохмаль – 1,5, рН 7,3.

Маточний розчин ПГМГХ готували на основі 0,9 % NaCl. Аліквоту додавали до середовища інкубації бактерій і методом двократних розведень готували лійку концентрацій у діапазоні 2,81–0,011 мг/мл. 1 мл бактеріальної суспензії ($0,5 \times 10^6$ КУО) з відповідною концентрацією ПГМГХ інкубували за 37 °C протягом 24 год. МІК вважали концентрацію з візуально відсутніми ростом відповідного штаму бактерій. Повторюваність дослідів була трикратною.

Досліджено антибактеріальні властивості гідрогелів з ПГМГХ *in vitro*. Зразки гідрогелів інкубували протягом 24 год у розчинах ПГМГХ 0,1, 0,3, 0,5, 0,75 та 1 мг/мл. Антибактеріальну активність гідрогелів перевіряли дискодифузійним методом щодо штамів *Staphylococcus aureus* (ATCC 29213), *Escherichia coli* (ATCC 25922), *Pseudomonas aeruginosa* (ATCC 277253) і *Klebsiella quasipneumoniae* (ATCC 700603). Дослідження проводили на агарі Мюллера–Хінтона такого складу: агар-агар мікробіологічний – 17, гідролізат казеїну – 17,5, пептон ферментативний – 2, крохмаль – 1,5, pH 7,3. Фрагменти гідрогелів діаметром близько 5 мм і висотою 1-2 мм розміщували на агар із відповідним штамом бактерій. Чашки Петрі інкубували за 37 °C протягом 24 год. Діаметр зони затримки росту навколо гідрогелів вимірювали штангенциркулем Міол 15-240. Дослідження повторювали тричі.

Результати

Було отримано полімерні матеріали, формули яких представлено на рис. 1. У результаті обмеженого набухання зшитий ПАА представляє собою гідрогель, який володіє хорошими дифузійними та сорбційними властивостями, ступінь набухання становить 1370 % (Nadtoka, Virych, & Kutsevol, 2021). У водному розчині ПГМГХ гідрогель здатний сорбувати на своїй поверхні бактерицидний полімер і утворювати матеріал з пролонгованими антибактеріальними властивостями, який може використовуватись як покриття для ран.

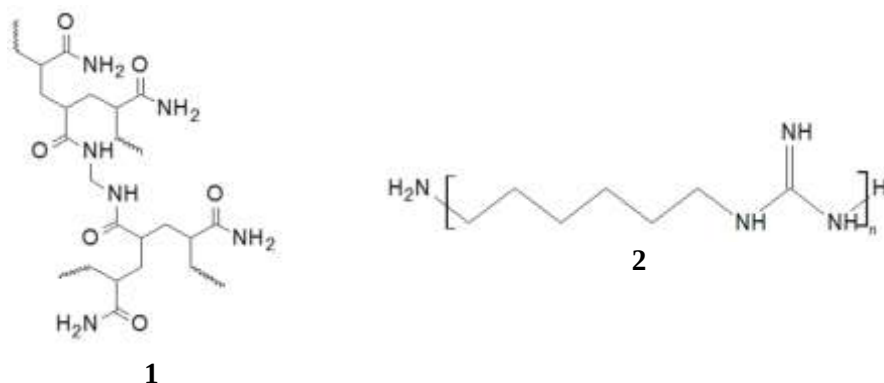


Рис. 1. Структурні формули полімерів:
1 – ковалентно зшитий ПАА, 2 – ПГМГХ

На першому етапі було протестовано розчин ПГМГХ щодо дії на штам поширених хвороботворних бактерій та визначено його мінімальну інгібуючу

концентрацію (МІК). МІК водного розчину полімеру ПГМГХ для *Staphylococcus aureus* та *Escherichia coli* – 88 мкг/мл, для *K. quasipneumoniae* – 175 мкг/мл, для *P. aeruginosa* – 175 мкг/мл, – що вказує на високу бактерицидну активність полімеру порівняно з іншими бактерицидними агентами на основі альдегідів або хлоровмісних речовин (Салманов, 2017, с. 92–125). Розчин ПГМГХ з концентраціями вище 0,5 мг/мл осаджувалися у середовищі Мюллера–Хінтона, що є проявом його флокулятивних властивостей (Нижник та ін, 2004, с. 16–25).

Сорбований на поверхню гідрогелю ПГМГХ проявляє антибактеріальну активність у міру наявності вологого середовища і створює довкола зразків прозорий ареал, у якому не виявлено колоній бактерій, як видно на рис. 2. Цей ареал має відносно невелике збільшення зі зростанням концентрації розчину бактерицидного полімеру, у який було занурено гідрогель, і становить від 5 до 7 мм. Це може бути пов'язано з великою молекулярною масою антибактеріального полімеру, його обмеженою дифузією з гідрогелів та флокулятивними властивостями. Проте не виявлено росту бактерій під зразками і в безпосередній близькості до них, що є позитивним результатом та вказує на перспективність використання гідрогелевих матеріалів антибактеріального призначення широкого спектра дії.

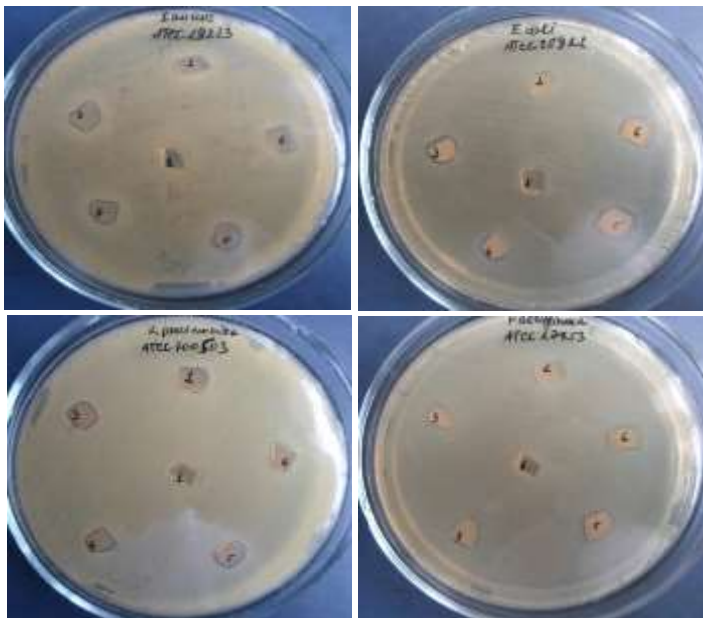


Рис. 2. Інгібування *S. aureus*, *E. coli*, *K. quasipneumoniae* та *P. aeruginosa* гідрогелями з ПГМГХ.

Концентрації ПГМГХ: 1 – 0 мг/мл; 2 – 0,1 мг/мл; 3 – 0,3 мг/мл; 4 – 0,5 мг/мл; 5 – 0,75 мг/мл; 6 – 1 мг/мл

Дискусія і висновки

За допомогою класичних методів радикальної полімеризації та поліконденсації було отримано гідрофільні полімери – зшитий поліакриламід та полігексаметиленгуанідин гідрохлорид. У результаті їх комбінації було отримано зразки та досліджено бактерицидні властивості на їхній поверхні. Було показано високу антибактеріальну ефективність водних розчинів ПГМГХ та поверхневого шару гідрогелю з адсорбованим ПГМГХ щодо штамів бактерій *S. aureus*, *E. coli*, *K. quasipneumoniae* та *P. aeruginosa*. Отримані зшиті гідрогелі є перспективними матеріалами для створення раневих пов'язок і можуть бути використані в медицині, у лікарняній практиці, у ветеринарії, у побуті тощо.

Внесок авторів: Оксана Надтока – концептуалізація, написання – оригінальна чернетка, редагування; Вірич Павло – валідація даних, написання – оригінальна чернетка, формальний аналіз; Наталія Куцевол – написання – перегляд і редагування.

Список використаних джерел

Нижник, Т.Ю., Баранова, А.И., Рокицька, О.В., & Нижник, В.В. (2004). Комплексоутворення іонів міді з полігексаметиленгуанідиним у водному середовищі. *Журнал Хроматографічного товариства*. IV(2), 16–25. <https://doi.org/10.15407/zht>

Салманов, А.Г. (2017). Резистентність до антибіотиків та біоцидів. *International Journal of Antibiotics and Probiotics*, 1(2), 92–125. <https://doi.org/10.31405/ijap.1-2.17.07>

Nadtoka, O., Kutsevol, N., Linnik, O., & Nikiforov M. (2019). Nanocomposite Hydrogels Containing Silver Nanoparticles as Materials for Wound Dressings. *Springer Proceedings in Physics*, 222, 375–387. https://doi.org/10.1007/978-3-030-17755-3_24

Nadtoka, O., Virych, P., & Kutsevol, N. (2021). Synthesis and absorption properties of hybrid polyacrylamide hydrogels. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 719(1), 84–93. <https://doi.org/10.1080/15421406.2020.1862464>

Walczak, M., Richert, A., & Burkowska-But, A. (2014). The effect of polyhexamethylene guanidine hydrochloride (PHMG) derivatives introduced into polylactide (PLA) on the activity of bacterial enzymes. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 41(11), 1719–1724. <https://doi.org/10.1007/s10295-014-1505-5>

References

Nadtoka, O., Kutsevol, N., Linnik, O., & Nikiforov M. (2019). Nanocomposite Hydrogels Containing Silver Nanoparticles as Materials for Wound Dressings. *Springer Proceedings in Physics*, 222, 375–387. https://doi.org/10.1007/978-3-030-17755-3_24

Nadtoka, O., Virych, P., & Kutsevol, N. (2021). Synthesis and absorption properties of hybrid polyacrylamide hydrogels. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 719(1), 84–93. <https://doi.org/10.1080/15421406.2020.1862464>

Nizhnik, T.Yu., Baranova, A.I., Rokitska, O.V., Nizhnik, V.V. (2004). Complex formation of copper ions with polyhexamethyleneguanidine in an aqueous environment. *Zurnal Hromatograficnogo tovaristva Journal of the Chromatographic Society*, IV(2), 2, 16–25 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/zht>

Salmanov, A.G. (2017). Resistance to antibiotics and biocides. *International Journal of Antibiotics and Probiotics*, 1(2), 92–125 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31405/ijap.1-2.17.07>

Walczak, M., Richert, A., & Burkowska-But, A. (2014). The effect of polyhexamethylene guanidine hydrochloride (PHMG) derivatives introduced into polylactide (PLA) on the activity of bacterial enzymes. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 41(11), 1719–1724. <https://doi.org/10.1007/s10295-014-1505-5>

Отримано редакцією збірника / Received: 04.07.24

Прорецензовано / Revised: 18.07.24

Схвалено до друку / Accepted: 30.09.24

Oksana NADTOKA¹, PhD (Chem.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0003-1868-3885
e-mail: nadtoka_oksana@knu.ua

Pavlo VIRYCH¹, PhD (Biol.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0002-1463-1992
e-mail: sphaenodon@ukr.net

Nataliya KUTSEVOL¹, DSc (Chem.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0002-1468-4111
e-mail: kutsevol@ukr.net

¹Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

ANTIBACTERIAL PROPERTIES OF HYDROGELS BASED ON POLYACRYLAMIDE AND POLYHEXAMETHYLENEGUANIDINE HYDROCHLORIDE

Introduction. *The research is devoted to developing biomedical polymer materials that have antibacterial properties.*

Methods. *Two hydrophilic synthetic polymers – covalently cross-linked polyacrylamide and poly hexamethylene guanidine hydrochloride – were synthesized by radical polymerization and polycondensation, respectively.*

Results. *As a result of limited swelling, cross-linked polyacrylamide in aqueous solution forms hydrogels with good diffusion and sorption properties, the degree of swelling is 1370 %. The bactericidal properties of PGMHC were evaluated by determining the minimum inhibitory concentration of strains Staphylococcus aureus, Escherichia coli, Pseudomonas aeruginosa, and Klebsiella quasipneumoniae bacteria and showed the high activity of the polymer in aqueous solution at concentrations less than 175 µg/ml. As a result of the sorption of PGMHC from solutions of different concentrations onto the surface of the hydrogel, samples with different contents of the active substance in the sample were obtained. Samples of PAA hydrogels from PGMHC were tested by the disk diffusion method against the strains of the specified bacteria, and their antibacterial properties were shown.*

Conclusions. *Thus, PAA hydrogels with poly hexamethylene guanidine hydrochloride adsorbed on their surface, possessing low toxicity, biological destruction, and non-aggressiveness to other materials and biological tissues, due to their antibacterial properties can be used as wound dressings that prevent infectious diseases.*

Key words: *hydrogels, polyacrylamide, polyhexamethyleneguanidine hydrochloride, antibacterial properties.*

Автори О. Надтока та П. Вірич заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Член редакційної колегії Н. Куцевол заявляє про відсутність конфлікту інтересів та невтручання в процес оцінювання цієї статті відповідно до міжнародних стандартів публікаційної етики. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors O. Nadtoka and P. Virych declare no conflicts of interest. The member of the Editorial board N. Kutsevol declares no conflict of interest and has not interfered in the evaluation process of this article, in accordance with international publication ethics standards. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

Віктор ЧЕРНЯК¹, д-р мед. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0001-8424-4691
e-mail: victorchernyak.ohta@gmail.com

Лідія БУЦЬКА¹, д-р мед. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0002-7928-0177
e-mail: Ukraina2025@gmail.com

Олена МЯЛОВИЦЬКА¹, д-р мед. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0002-5382-0032
e-mail: myalovicka@gmail.com

Володимир БУЛЬДА¹, д-р мед. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0002-4648-9484
e-mail: vibulda@knu.ua

Валентин РИЖАК², магістр
ORCID ID: 0009-0008-0157-2461
e-mail: Ryzhak@outlook.com

¹ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна,

² Optimum Media OMD, Київ, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ ПЕРСОНАЛІЗОВАНОГО ПІДХОДУ ДО ФОРМУВАННЯ ПРОТОКОЛУ РЕАБІЛІТАЦІЇ ВІЙСЬКОВИХ ІЗ ПТСР ТА УРАЖЕННЯМИ ГОЛОВНОГО МОЗКУ

Вступ. Робота присвячена вирішенню проблеми посттравматичного стресового розладу (ПТСР) у військових із ураженнями головного мозку шляхом застосування персоналізованого підходу до формування протоколу їх реабілітації.

Методи. При цьому застосовано аналіз протоколів клінічних спостережень щодо ефективності реабілітації хворих із проявами ПТСР та/або ураженнями головного мозку (ГМ).

Результати. Розроблено медико-технічні вимоги до терапевтичного приладу, що був частиною комплексної програми діагностики та персоналізованої реабілітації військових, учасників бойових дій.

Висновки. Розроблена програма реабілітації військових та осіб, що постраждали внаслідок військових дій і страждають на ураження ГМ та симптоми ПТСР, а також технологія формування персоналізованого протоколу реабілітації військових з ПТСР та ураженнями ГМ дозволяє систематизувати роботу мультигалузової лікувальної команди.

Ключові слова: посттравматичний стресовий розлад, реабілітація, військові, персоналізований підхід.

Вступ

Дослідженням проблематики бойової черепно-мозкової травми (БЧМТ) у цілому, і контузії головного мозку зокрема, займалася велика плеяда вітчизняних вчених, а саме: Р. Баннікова, В. В. Білошицький, Л. В. Буцька,

© Черняк Віктор, Буцька Лідія, Мяловицька Олена,

Бульда Володимир, Рижак Валентин, 2024

М. В. Чухраєв, О. О. Древіцька (Баннікова, Калінкін, & Магнушевський, 2016; Білошицький та ін., 2016; Буцька, & Чухраєв, 2017; Буцька, Древіцька, & Чухраєв, 2017; Chukhraiev et al. 2017; Чухраєв та ін., 2017; Чухраєв та ін., 2022; Butska, 2023, 2024; Butska et al., 2021; Древіцька та ін., 2021; Chukhraev, 2019; Бурлака та ін., 2015) та інші. Серед зарубіжних вчених варто зазначити М. М. Weightman, М. R. Scherer, L. E. Goldstein, R. D. Vanderploeg, L. Holm, K. Meyer та інших, які вказують на ключову роль фізичної терапії в реабілітації військових після травм головного мозку.

Заслуговує на увагу, на нашу думку, розкриття певних аспектів патогенезу, клініки, діагностики та лікування наслідків черепно-мозкових травм, отриманих у військовий час, і соціально-психологічної реабілітації військовослужбовців із районів військових конфліктів (Буцька, & Чухраєв, 2017). У вітчизняній науковій літературі ми маємо ряд фундаментальних вітчизняних досліджень, що розвивають теорію та практику фізичної терапії: О. К. Марченко, В. М. Мухіна, вагомих медичних праць Ю. П. Горго, В. А. Єпіфанова, І. В. Шурпак, Л. В. Буцької, І. З. Самосюк, М. В. Чухраєва. З іншого боку, глибина задачі настільки велика, що зберігається дефіцит літератури, яка докладно та доказово досліджує методики фізичної терапії для пацієнтів, що мають симптоматику контузії головного мозку.

Також у науковій літературі бракує праць, які стосуються застосування немедикаментозних засобів і методів фізичної терапії для відновлення нейропластичних функцій, динамічного компонента діяльності, вдосконалення певних компетенцій у комбатантів як вузької категорії пацієнтів із специфічною мотивацією і, відповідно, специфічністю вибору реабілітаційного інструментарію фізичної терапії. Адже пошук нових алгоритмів, методів, створення альтернативних технологій для розробки й оптимізації комплексної програми фізичної терапії військовослужбовців, які перенесли контузію головного мозку, є надзвичайно актуальною для сучасної України.

Уже понад 20 років існує принцип мультимодального знеболення, а проблеми достатнього знеболення залишаються не вирішеними. А коли підходити до знеболення шаблонно, одні пацієнти отримують надмірні дози знеболювальних препаратів, що призведе до виникнення побічних ефектів від них, інші пацієнти отримують недостатнє знеболення й можуть мати ускладнення, пов'язані із сильним болем, а саме: аритмії, тромботичні ускладнення, парез кишечника, хронізацію болю. Тому необхідність створення науково-практичних реабілітаційних центрів із відділеннями для лікування пацієнтів, що постраждали під час російської агресії в Україні, є пріоритетною. Військові, що страждають на больові синдроми та ПТСР у відділеннях реабілітації і готуються до протезування чи інших лікувальних заходів, для довгострокової амбулаторної реабілітації потребують автоматизованих систем функціональної діагностики та алгоритмів формування персоналізованого протоколу лікування.

Мета роботи розробити автоматизовану систему персоналізованого підходу до формування протоколу реабілітації військових із ПТСР та ураженнями головного мозку, а також відповідний алгоритм.

Завдання роботи:

1. Дослідити взаємозв'язок між симптомами ПТСР та спектральною щільністю електроенцефалографії (ЕЕГ).
2. Розробити алгоритм побудови персоналізованого протоколу реабілітації хворих із проявами ПТСР та/або ураженнями ГМ, відповідно до параметрів ЕЕГ.
3. Виконати клінічні спостереження щодо ефективності реабілітації хворих із проявами ПТСР та/або ураженнями ГМ.
4. Розробити медико-технічні вимоги до терапевтичного приладу, що є частиною комплексної програми діагностики та персоналізованої реабілітації військових, учасників бойових дій.
5. Запропонувати медикamentозну підтримку запропонованої системи реабілітації військових із ПТСР та ураженнями головного мозку.

Методи

Відбір пацієнтів проводили за ознаками інтенсивного больового синдрому і порушеннями сну, що відповідає клінічним ознакам ПТСР. Пацієнтів з ураженнями головного мозку відбирали для дослідження як проспективно, так і ретроспективно. Багатьом із них проводили оперативні втручання з видалення уламків різноманітних розмірів і матеріалів. Особливо важко було виявити уламки зі скла, пластику і деревини. У таких випадках це здійснювалось за допомогою розробленого авторами інноваційного пристрою. Насамперед розроблена програма діагностики та персоналізованої реабілітації військових, учасників бойових дій та осіб, що постраждали від військових дій в Україні, із симптоматикою уражень головного мозку та посттравматичних стресових розладів методом транскраніальної латеральної мікрополяризації імпульсними струмами в поєднанні з індукційною нейростимуляцією із застосуванням бінауральних ритмів, передбачає також підготовку медико-технічних вимог до розробки та виготовлення оригінального приладу для проведення реабілітації означених вище груп постраждалих.

У роботі були застосовані розроблені нами медико-технічні вимоги до інноваційного терапевтичного приладу. Він є частиною комплексної програми діагностики та персоналізованої реабілітації військових, учасників бойових дій та осіб, що постраждали від військових дій в Україні із симптоматикою уражень головного мозку та посттравматичних стресових розладів методом транскраніальної нейростимуляції головного мозку (ТКНСГМ). Програма і пристрої для транскраніальної нейростимуляції головного мозку (ТКНСГМ) включали: електронейростимуляцію, індукційну нейростимуляцію кори головного мозку, нейроакустичну стимуляцію головного мозку, світло-імпульсну стимуляцію зорових аналізаторів на основі багаторівневого мультифакторного підходу. Під час проведення дослідження було використано: функціональну діагностику роботи мозку (ЕЕГ), психометричні таблиці та опитувальники психологічного стану хворих на ПТСР. Як джерело імпульсного струму ми використали апарат для електролікування – модель МІТ-ЕФ2 – для виконання

нейро-акустичної стимуляції головного мозку пацієнтів, а також було використано апарат для магнітотерапії – комбінований (модель "ТАРА").

Однією з найважливіших складових успішного лікування була здатність забезпечувати комфорт та психологічний спокій пацієнтів, особливо під час неприємних болючих медичних процедур. Оптимальним вважали використання таких інгаляційних анальгетиків, як: Метоксифлуран, що дозволяє комплексно впливати на біль, який, окрім зниження рівня болю, змінює суб'єктивне сприйняття болю пацієнтом завдяки протитривожному ефекту. Із цією метою застосовували Юмерокс® Інгал – індивідуальний пристрій, що призначений для інгаляційного застосування Метоксифлурану. Дозування: 1 знеболювальна доза – 1 шприц об'ємом 2 мл. Максимальна добова доза – 6 мл, але не більше 15 мл на тиждень. Для кращого ефекту перед початком процедури проводили інгаляцію Метоксифлураном протягом 5 хв.

Результати

Досліджено взаємозв'язок між симптомами ПТСР та спектральною щільністю ЕЕГ, особливо цей зв'язок простежувався у пацієнтів з порушенням сну. Доведено, що STEP-UP аналгезія – це повний контроль над болем різної інтенсивності. У випадку слабого болю візуальною аналоговою шкалою (ВАШ 10–40 мм) було застосовано: Інфулган – 1 флакон 4 рази на добу; Кейдекс – 1 ампула в/м, в/в 3 рази на добу. У випадку болю середньої інтенсивності (ВАШ 40–70 мм) було застосовано: Інфулган – 1 флакон 4 рази на добу; Кейдекс – 1 ампула в/м, в/в 3 рази на добу; Ропілонг – 1 флакон зі швидкістю 6–16 мл/год через епідуральний катетер. У випадку сильного болю (ВАШ 70–100 мм) було застосовано: Інфулган – 1 флакон 4 рази на добу; Кейдекс – 1 ампула в/м, в/в 3 рази на добу; Ропілонг – 1 флакон зі швидкістю 6–16 мл/год через епідуральний катетер; Налбуфін – 1 ампула 1-2 рази на добу. Також рекомендовано застосовувати Юмерокс® Інгал – індивідуальний пристрій, що призначений для інгаляційного введення Метоксифлурану. Такий метод аналгезії дозволяє досягнути адекватного знеболення протягом 30 хв прогнозованої неприємної процедури.

У результаті виконання роботи було апробовано і рекомендовано до використання:

- програму реабілітації військових та осіб, що постраждали внаслідок військових дій і страждають на ураження головного мозку та симптоми ПТСР;
- технологію формування персоналізованого протоколу реабілітації військових із ПТСР та ураженнями головного мозку;
- медико-технічні вимоги для серійного виробництва приладу щодо реабілітації військових із ПТСР та ураженнями ГМ, а також інноваційного пристрою для пошуку уламків у вогнепальній рані.

Перевагою розробленої персоніфікованої програми є значне зменшення вартості, часу реабілітації військових із проявами ПТСР та/або ураженнями головного мозку. Безпечність процедури терапевтичного впливу на головний мозок пацієнтів гарантується результатами виконаних досліджень, а також

розробка програми діагностики та персоналізованої реабілітації військових та осіб, що постраждали від військових дій в Україні, із симптоматикою уражень ГМ та ПТСР методом ТКНСГМ на основі багаторівневого мультифакторного підходу дали змогу створити замкнений цикл практичної реалізації системи реабілітації. Додавання до стандартних анальгетиків інгаляційного ненаркотичного знеболення дозволяє полегшити стан пацієнта та дає можливість провести процедуру максимально якісно і швидко, з комфортом для лікаря та пацієнта. Завдяки роботі мультигалузевої команди, членом якої є юрист, що спеціалізується на правових питаннях використання інтелектуальної власності, усі правові питання було обговорено та вирішено заздалегідь, що значно облегшує втілення програмного комплексу та його апробацію як в Україні, так і за кордоном.

Дискусія і висновки

1. Новостворений пристрій для транскраніальної нейростимуляції головного мозку на основі багаторівневого мультифакторного підходу дає змогу створити замкнений цикл реабілітації, а пристрій для виявлення уламків у рані сприяє швидшому поверненню фізичного здоров'я пацієнтам.

2. Знеболення з використанням STEP-UP аналгезії за рівнем болю за ВАШ дозволяє індивідуально підходити до кожного пацієнта.

3. Додавання до стандартних анальгетиків інгаляційного ненаркотичного знеболення дозволяє полегшити стан пацієнта та дає можливість провести процедуру максимально якісно і швидко, з комфортом для лікаря та пацієнта.

4. Розроблена програма реабілітації військових та осіб, що постраждали внаслідок військових дій і страждають на ураження головного мозку та симптоми ПТСР, а також технологія формування персоналізованого протоколу реабілітації військових з ПТСР та ураженнями головного мозку, дозволяють систематизувати роботу мультигалузевої лікувальної команди.

Внесок авторів: Віктор Черняк – концепція та дизайн дослідження, збір та аналіз частини літературних джерел, опрацювання тексту статті, кінцевий варіант тексту, аналіз матеріалів дослідження, підготовка статті до друку, формулювання завдань, мети, висновків, методів дослідження, написання анотації, розробка системи знеболення та портативного інноваційного пристрою для виявлення уламків у вогнепальній рані; Лідія Буцька – дизайн і концепція дослідження, збір матеріалів, підготовка чорнового та кінцевого варіанта тексту, аналіз отриманих результатів; Олена Мяловицька – збір та аналіз частини літературних джерел, форматування тексту статті, оформлення та підготовка статті до друку, загальна курація; Володимир Бульда – збір та аналіз частини літературних джерел, правова консультація, участь в аналізі матеріалів дослідження, формулюванні основних положень роботи, мети, завдань, висновків, редагування анотації; Валентин Рижак – збір та аналіз частини літературних джерел, загальна курація, юридичний супровід.

Подяки, джерела фінансування. Це дослідження проведено в рамках гранта від НФД України, але без фінансової підтримки в державному, комерційному або некомерційному секторах.

Список використаних джерел

- Баннікова, Р., Калінкін, К., & Магнушевський, Ю. (2016). Проблемні питання фізичної реабілітації осіб з наслідками травматичного ураження мозку. *Теорія і методика викладання фізичної культури і спорту*, 1, 23–26.
- Білошицький, В.В., Гук, А.П., Бондар, Т.С., Степаненко, І.В. & Солонович А.С. (2016). Оптимізація когнітивної нейрореабілітації пацієнтів із бойовими травматичними ураженнями головного мозку. *Міжнародний неврологічний журнал*, 5, 70–75.
- Бурлака, О.В., Железко, О.В., Уніченко, А.В., & Буцька, Л.В. (2015). *Спосіб корекції тривожно-депресивних розладів у осіб, які постраждали внаслідок бойових дій та надзвичайних ситуацій* (Патент України на корисну модель № 102217). ННЦ Інститут біології та медицини. https://biomed.knu.ua/images/stories/Kafedry/Vnutrishnoi_medicine/Vykladachi/CV_2023-24/CV_Butska_ukr_compressed.pdf
- Буцька, Л.В., & Чухраєв, М.В. (2017). *Психофізичні методи діагностики, профілактики та корекції психосоматичних розладів у осіб, що працюють в екстремальних ситуаціях*. ДП "Вид. дім "Персонал".
- Буцька, Л.В., Древіцька, О.О., & Чухраєв М.В. (2017). *Психофізіологічна реабілітація при болях синдромах*. 184–192. ДП "Вид. дім "Персонал".
- Древіцька, О., Сиропятов, О., Калантай, І., Буцька, Л. та ін. (2021). Аналіз окремих показників завершених суїцидів серед військовослужбовців. *Scientia*, 37–41. <https://ojs.ukrlogos.in.ua/index.php/scientia/article/view/1711717>
- Чухраєв, М.В., Буцька, Л.В., Оверчук, В.А., Малина, О.Г., Черняк, А.В., Самсонов, В.О., Чухраєва, О.М., & Уніченко, А.В. (2022). *Пристрій для корекції психосоматичного і психофункціонального стану людини* (Патент України на корисну модель № 150832, бюл. №17/2022).
- Чухраєв, М.В., Чухраєва, О.М., Бурлака, О.В., & Буцька Л.В. (2017). *Спосіб корекції психосоматичного стану хворого з вегето-судинною дистонією* (Патент України на корисну модель № 122206).
- Butska, L. (2023). Clinic, approaches to classification and terminology of low back pain, modern approaches to physical therapy of men 40-60 years old with dorsalgia at the outpatient stage. In L. Butska (Ed.), *Theory and methodology of innovative health care development in the national, European and global contexts* (pp.111–138). The University of Technology in Katowice Press. <https://doi.org/10.54264/M021>
- Butska, L. (2024). Clinical and physiological justification of the application of physical therapy as a component multidisciplinary approach in combatants after combat closed cranial brain injury (brain contusions). Multidisciplinary medicine and human health. In L. Butska (Ed.), *Theoretical and methodological foundations of the innovative development of the health care system in the information society* (pp. 24–47). The University of Technology in Katowice Press. <http://dx.doi.org/10.54264/M035>
- Butska, L. et al. (2021). Modern concepts of mechanisms of occurrence and development of pain syndromes of non-visceral origin in persons working in conditions of high psychophysical loads. Literature review,12. In L. Butska (Ed.), *Digital transformation of society: theoretical and applied approaches* (pp. 535–549). Publishing House of University of Technology.
- Chukhraev, N., Butskaya, L. et al. (2017). *Application of ultrasonic waves, magnetic fields and optical flow in rehabilitation*. Shupyk NMAPE, Pontifical Catholic University of Peru, Radomsko High School SCM "Medical Innovative Technologies".
- Chukhraev, N.V., Zukow, W., Unichenko, A.V., Butskaya, L.V., & Gres, O.O. (2019). Multidisciplinary approach in the treatment of spin diseases. *Journal of Education, Health and Sport*, 9(1), 294–307. <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.2553467>

References

- Bannikova, R., Kalinkin, K., & Mahnushevskiy, Yu. (2016). Problematic issues of physical rehabilitation of persons with the consequences of traumatic brain injury. *Theory and Methods of Physical Education and Sports*, 1, 23–26 [in Ukrainian].

Biloshytskyi, V.V., Huk, A.P., Bondar, T.S., Stepanenko, I.V., & Solonovych A.S. (2016). Optimization of cognitive neurorehabilitation of patients with combat traumatic brain injuries. *The International Neurological Journal*, 5, 70–75 [in Ukrainian].

Burlaka, O.V., Zhelezko, O.V., Unichenko, A.V., & Butska, L.V. (2015). *Method of correction of anxiety-depressive disorders in persons who suffered as a result of hostilities and emergency situations* (Patent of Ukraine for the utility model No.102217). NSC Institute of Biology and Medicine [in Ukrainian]. https://biomed.knu.ua/images/stories/Kafedry/Vnutrishnoi_medicine/Vykkladachi/CV_2023-24/CV_Butska_ukr_compressed.pdf

Butska, L. (2023). Clinic, approaches to classification and terminology of low back pain, modern approaches to physical therapy of men 40–60 years old with dorsalgia at the outpatient stage. In L. Butska (Ed.), *Theory and methodology of innovative health care development in the national, European and global contexts* (pp. 111–138). The University of Technology in Katowice Press. <https://doi.org/10.54264/M021>

Butska, L. (2024). Clinical and physiological justification of the application of physical therapy as a component multidisciplinary approach in combatants after combat closed cranial brain injury (brain contusions). Multidisciplinary medicine and human health. In L. Butska (Ed.), *Theoretical and methodological foundations of the innovative development of the health care system in the information society* (pp. 24–47). The University of Technology in Katowice Press. <http://dx.doi.org/10.54264/M035>

Butska, L. et al. (2021). Modern concepts of mechanisms of occurrence and development of pain syndromes of non-visceral origin in persons working in conditions of high psychophysical loads. Literature review, 12. In L. Butska (Ed.), *Digital transformation of society: theoretical and applied approaches* (pp. 535–549). Publishing House of University of Technology.

Butska, L.V., & Chukhraiev, M.V. (2017). *Psychophysical methods of diagnosis, prevention and correction of psychosomatic disorders in persons working in extreme situations: monograph*. SC "Personal Publishing House".

Butska, L.V., Drevitska, O.O., & Chukhraiev, M.V. (2017). *Psychophysiological rehabilitation for pain syndromes*. 184–192. SC "Personal Publishing House" [in Ukrainian].

Chukhraiev, M.V., Butska, L.V., Overchuk, V.A., Malyna, O.H., Chernyak, A.V., Samsonov, V.O., Chukhraieva, O.M., & Unichenko, A.V. (2022). *Device for correction of the psychosomatic and psychofunctional state of a person* (Patent of Ukraine for the utility model No. 150832, bull. No. 17/2022).

Chukhraev, N.V., Zukow, W., Unichenko, A.V., Butskaya, L.V., & Gres, O.O. (2019). Multidisciplinary approach in the treatment of spin diseases. *Journal of Education, Health and Sport*, 9(1), 294–307. <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.2553467>

Chukhraiev, N., Butskaya, L. et al. (2017). *Application of ultrasonic waves, magnetic fields and optical flow in rehabilitation*. Shupyk NMAPE, Pontifical Catholic University of Peru, Radomsko High School SCM "Medical Innovative Technologies".

Chukhraiev, M.V., Chukhraieva, O.M., Burlaka O.V., & Butska, L.V. (2017). *Method of correction of the psychosomatic condition of a patient with vegetative-vascular dystonia* (Patent of Ukraine for the useful model No.122206) [in Ukrainian].

Drevitska, O., Syropiatov, O., Kalantai, I., Butska, L. et al. (2021). Analysis of individual indicators of completed suicides among military personnel. *Scientia*, 37–41 [in Ukrainian]. <https://ojs.ukrlogos.in.ua/index.php/scientia/article/view/1711717>

Отримано редакцією збірника / Received: 03.07.24

Прорецензовано / Revised: 14.08.24

Схвалено до друку / Accepted: 01.10.24

Viktor CHERNYAK¹, DSc (Med.), Prof.
ORCID ID: 0000-0001-8424-4691
e-mail: victorchernyak.ohta@gmail.com

Lidia BUTSKA¹, DSc (Med.), Prof.
ORCID ID: 0000-0002-7928-0177
e-mail: Ukraina2025@gmail.com

Olena MYALOVYTSKA¹, DSc (Med.), Prof.
ORCID ID: 0000-0002-5382-0032
e-mail: myalovicka@gmail.com

Volodymyr BULDA¹, DSc (Med.), Prof.
ORCID ID: 0000-0002-4648-9484
e-mail: vibulda@knu.ua

Valentin RYZHAK², Master of Law
ORCID ID: 0009-0008-0157-2461
e-mail: Ryzhak@outlook.com

¹ Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

² Optimum Media OMD, Kyiv, Ukraine,

APPLICATION OF A PERSONALIZED APPROACH TO THE FORMATION OF THE REHABILITATION PROTOCOL FOR MILITARY PEOPLE WITH PTSD AND BRAIN INJURIES

Introduction. *The work is devoted to the problems of post-traumatic stress disorder (PTSD) in soldiers with brain lesions by applying a personalized approach to the formation of their rehabilitation protocol.*

Methods. *At the same time, an analysis of clinical observation protocols was applied regarding the effectiveness of rehabilitation of patients with PTSD and/or brain lesions (BM).*

Results. *Medical and technical requirements were developed for a therapeutic device that was part of a comprehensive program of diagnostics and personalized rehabilitation of military personnel, participants in hostilities.*

Conclusions. *The developed rehabilitation program for military personnel and persons injured as a result of military operations and suffering from brain damage and symptoms of PTSD, as well as the technology for forming a personalized rehabilitation protocol for military personnel with PTSD and brain damage, allows for the systematization of the work of a multidisciplinary treatment team.*

Keywords: *post-traumatic stress disorder, rehabilitation, military, personalized approach.*

Автори В. Черняк, Л. Буцька, В. Бульда та В. Рижак заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Член редакційної колегії О. Мядовицька заявляє про відсутність конфлікту інтересів та невтручання в процес оцінювання цієї статті відповідно до міжнародних стандартів публікаційної етики. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors V. Chernyak, L. Butska, V. Bulda and V. Ryzhak declare no conflicts of interest. The member of the Editorial board O. Myalovytska declares no conflict of interest and has not interfered in the evaluation process of this article, in accordance with international publication ethics standards. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

Олександр ЧАЛИЙ¹, д-р фіз.-мат. наук, проф.

ORCID ID: 0000-0002-5755-3875

e-mail: avchalyi7@gmail.com

Наталія ГРИЦЕНКО¹, канд. пед. наук, доц.

ORCID ID: 0000-0001-7686-4540

e-mail: nataly812305@gmail.com

Альбіна КРИШТОПА¹ ст. викл.

ORCID ID: 0000-0003-1034-7342

e-mail: alla335578@gmail.com

Ірина МАРГОЛИЧ¹, канд. фіз.-мат. наук, доц.

ORCID ID: 0009 0000 6426 2593

e-mail: iryna.margolych@gmail.com

Галина ХРАПІЙЧУК¹, канд. фіз.-мат. наук, доц.

ORCID ID: 0009-0008-6978-5850

e-mail: halynakhrapiichuk@gmail.com

¹Національний медичний університет імені О. О. Богомольця, Київ, Україна

ЗАКОН ЗБЕРЕЖЕННЯ МАСИ В МЕТОДІ ПОЗИТРОННОЇ ЕМІСІЙНОЇ ТОМОГРАФІЇ

Презентацію присвячено актуальній проблемі медичної фізики, яка пов'язана із законом збереження маси в сучасному діагностичному методі позитронної емісійної томографії (ПЕТ). Теоретична основа методу ПЕТ базується на явищі анігіляції електрона і позитрона з утворенням двох гамма-квантів, тобто фотонів короткохвильового електромагнітного випромінювання гамма-діапазону. Проблема полягає в тому, що електрон і позитрон мають відмінну від нуля сумарну масу спокою, тоді як фотон представляє собою елементарну частинку, у якій відсутня маса. Тому виникає природне питання, чи дійсно спостерігається порушення закону збереження маси в процесі анігіляції електрона і позитрона в одному з основних діагностичних методів ПЕТ, який широко використовується в медичній практиці поряд з такими іншими діагностичними методами, як магнітна резонансна томографія (МРТ) та комп'ютерна томографія (КТ)? Проведене теоретичне дослідження надає послідовну та науково обґрунтовану відповідь на це принципове питання.

Ключові слова: позитронна емісійна томографія (ПЕТ); процес анігіляції електрона та позитрона; границі застосування формули Ейнштейна $E = mc^2$; релятивістська формула для зв'язку енергії, маси та імпульсу; формула для маси двофотонного комплексу; закон збереження маси в методі ПЕТ.

Вступ

У цій презентації розглядаються фізичні основи сучасного діагностичного і лікувального методу позитронної емісійної томографії (ПЕТ) з акцентом на важливу проблему, пов'язану із законом збереження маси частинок, які беруть участь на всіх етапах реалізації методу ПЕТ. У досягненні цієї мети автори

© Чалий Олександр, Гриценко Наталія, Криштопа Альбіна,
Марголич Ірина, Храпійчук Галина, 2024

ставляють перед собою досить складне завдання – зберегти, по можливості, певну фізичну строгість викладу, мінімізуючи при цьому кількість використаних формул. Як писав Стівен Хокінг у книзі (Hawking, 1988, р. 272): "Мені сказали, що кожна формула в книзі удвічі зменшує кількість покупців. Тоді я вирішив взагалі обійтися без формул. Щоправда, врешті я все-таки написав одне рівняння – знамените рівняння Ейнштейна $E = mc^2$. Сподіваюся, це не відлякає половину моїх потенційних читачів".

Ми збираємося написати трохи більше формул. Одна із них – та сама формула Ейнштейна, яку згадував Стівен Хокінг. Проте будуть вказані суттєві умови (границі) застосування цієї формули. Окрім того, буде використана ще одна релятивістська формула, яка враховує послідовно ефекти теорії відносності та ϵ , безумовно, більш важливою, ніж формула Ейнштейна $E = mc^2$. Причиною для цього твердження є той факт, що формула Ейнштейна впливає із цієї релятивістської формули лише за певних спеціальних умов. Декілька інших формул, які будуть використані в цій презентації, представляють собою наслідки вказаної релятивістської формули. Саме ці останні формули дадуть можливість знайти відмінну від нуля масу двофотонного комплексу з антипаралельними векторами імпульсів гамма-квантів, які виникають у результаті анігіляції електрона і позитрона та відповідальні за закон збереження маси в методі ПЕТ.

Фізичний принцип методу ПЕТ та особливості його застосування.

Основним фізичним принципом, що лежить в основі методу ПЕТ, є процес анігіляції електрона і позитрона (іншими словами, реакція взаємного зникнення матерії та антиматерії) з утворенням двох фотонів, які є квантами високочастотного електромагнітного поля в діапазоні гамма-випромінювання (Чалий та ін., 2001). Обговоримо деякі особливості застосування методу ПЕТ у відділенні медичної фізики Університету Вісконсін-Медісон (США). На той час, близько 25 років тому, це відділення очолював професор Пол Делука, а один з авторів цієї статті (О.Ч.) виконував свій дослідницький проєкт як професор-переможець освітньої Програми академічних обмінів імені Дж. Вільяма Фулбрайта. Додаткову інформацію щодо результатів наших спільних досліджень можна знайти в (Chalyi, & Deluka, 1999).

У спеціальних експериментальних пристроях, призначених для вивчення ядерних реакцій (прикладом такого пристрою є циклотрон), створюються досить короткоживучі ізотопи з періодом піврозпаду $T_{1/2}$ порядку декількох хвилин або десятків хвилин (Cameron, & Skofronik, 1978; Chalyi, 2020; Bushberg, & Seibert, 2022). Зазвичай використовують ізотопи легких елементів другого періоду таблиці Менделєєва, наприклад, ізотопи вуглецю $^{11}_6\text{C}$ із періодом піврозпаду $T_{1/2} = 20,4$ хв, азоту $^{13}_7\text{N}$ із періодом піврозпаду $T_{1/2} = 9,96$ хв, кисню $^{15}_8\text{O}$ із періодом піврозпаду $T_{1/2} = 2,04$ хв, фтору $^{18}_9\text{F}$ із періодом піврозпаду $T_{1/2} = 109,8$ хв. Ядра ізотопів таких елементів складаються приблизно з однакової кількості протонів і нейтронів, причому в результаті

перетворення протона на нейтрон у них відбувається спонтанний бета-розпад з утворенням позитронів.

Далі препарат, що містить позитронно-активні ізотопи, які штучно виробляються на циклотроні, швидко доставляються, наприклад, у відділення радіаційної онкології та вводяться пацієнтам. При цьому відбувається анігіляція частинок антиматерії, якими є позитрони, під час їх взаємодії з електронами, які завжди містяться в тілі людини, оскільки ми живемо в матеріальному (а не в антиматеріальному!) світі. У результаті реакції анігіляції кожної електрон-позитронної пари виникають зазвичай два гамма-кванти (фотони), які розлітаються в протилежні напрямки відповідно до закону збереження імпульсу. Завдяки іншому фундаментальному закону природи, яким є закон збереження енергії, повна енергія електрона і позитрона перетворюється на енергію двох фотонів. При цьому енергія кожного фотона (гамма-кванта) виявляється такою, що дорівнює $8,18 \cdot 10^{-14}$ Дж. Зазначені особливості дозволяють використовувати спеціальну схему збігів та комп'ютерні програми для реєстрації цих фотонів з подальшою візуалізацією та аналізом отриманих зображень.

Слід зазначити, що фтордезоксіглюкоза (тобто ізотоп фтору ^{18}F із періодом піврозпаду $T_{1/2} = 109,8$ хв; радіоактивний індикатор – фтор-18, FDG – PET) знаходить широке застосування у використанні методу ПЕТ у радіаційній медицині через свої найбільші (серед перерахованих вище) значення періоду піврозпаду $T_{1/2}$ та найменші значення поглиненої і еквівалентної доз іонізуючого випромінювання. Як відомо, чим більше період піврозпаду $T_{1/2}$ радіоактивного ізотопу (радіонукліду), тим менша кількість радіоактивних розпадів за одиницю часу і відповідно потужності поглиненої та еквівалентної доз. Пошук ефективних радіофармацевтичних препаратів, що мінімізують дозові навантаження на пацієнта, був і залишається актуальною проблемою використання методу ПЕТ для діагностики та лікування злоякісних пухлин, а також вивчення особливостей фізіологічних процесів у мозку та інших органах людини.

Значення загальної проблеми маси та методи її розв'язання. Здається на перший погляд, що закон збереження маси в діагностичному методі ПЕТ представляє собою досить вузьку теоретичну проблему медичної фізики. Насправді йдеться про надзвичайну за своєю складністю фундаментальну наукову проблему маси в найбільш широкому сенсі, яка має визначальне науково-методичне значення не тільки для медичної фізики, але й велике світоглядне та загально-філософське значення для живої і неживої природи в цілому.

Відповідь на фундаментальне питання щодо природи маси та енергії у Всесвіті (включаючи також і теоретичну проблему збереження маси в діагностичному методі ПЕТ) потребує використання методів досліджень та основних положень таких розділів фізики, як спеціальна і загальна теорія відносності, нерелятивістська та релятивістська квантова механіка, квантова теорія поля, астрофізика, космологія.

Межі застосування формули Ейнштейна $E = mc^2$. Вважається, що вперше Альберт Ейнштейн отримав свою знамениту формулу

$$E = mc^2, \quad (1)$$

яку часто називають законом еквівалентності енергії E та маси m , у 1905 р. у статті (Einstein, 1905). Самої формули (1) у цій статті не було наведено, але були написані такі слова, які в українському перекладі та зі збереженням оригінальних позначень повністю відповідають формулі (1): "Маса тіла є мірою енергії, яка міститься в ньому; якщо енергія змінюється на величину L , то маса змінюється відповідно на величину $L / 9 \cdot 10^{20}$, причому тут енергія вимірюється в ергах, а маса – у грамах". Зазначимо, що в ті роки популярною системою одиниць, якою користувався Ейнштейн, була система СГСЕ, у якій для одиниць довжини, маси, часу та енергії використовувалися сантиметр, грам, секунда та ерг, відповідно. Тому в наведеному формулюванні закону еквівалентності енергії та маси Альберт Ейнштейн використав для швидкості світла c у вакуумі значення $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/с.

Релятивістська формула для зв'язку між енергією, масою та імпульсом тіла. Надалі будемо говорити про найважливішу, на нашу думку, формулу спеціальної теорії відносності (СТВ), яка описує зв'язок між енергією E , масою m та імпульсом $\vec{p}$ тіла, яке рухається зі швидкістю $\vec{v}$. Ця формула має вигляд

$$E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2. \quad (2)$$

Виведення формули (2) можна знайти в книгах (Landau, & Lifshits, 1971; 1976) класичного курсу теоретичної фізики Л.Д. Ландау і Є.М. Ліфшиця. Дуже виразним щодо цього є рис. 1, на якому зображено, як великий італійський фізик Енріко Фермі (1901–1954) вказує саме на формулу, що повністю еквівалентна релятивістській формулі (2). Зазначена формула (2), без сумніву, важливіша за більш відому формулу Ейнштейна (1) для зв'язку енергії та маси. Очевидною причиною правильності такого твердження є той факт, що формула (1) є частинним випадком як формули (2), так і тотожної до (2) формули, на яку вказує Енріко Фермі.

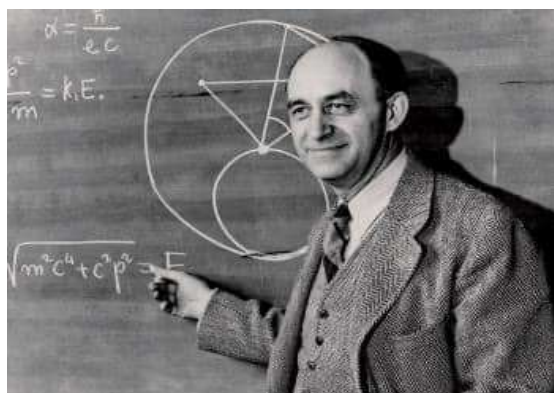


Рис. 1. Енріко Фермі, лауреат Нобелівської премії з фізики за 1938 рік, демонструє формулу (2)

Дійсно, формула Ейнштейна (1) отримується із формули (2) тільки за умови, коли імпульс тіла $\vec{p} = 0$. Це означає, що маємо такий принциповий висновок: **знаменита формула Альберта Ейнштейна $E = mc^2$ характеризує зв'язок енергії спокою тіла E та маси спокою m** . За відсутності стану спокою зв'язок між енергією E , масою m та імпульсом $\vec{p}$ описується не виразом (1), а більш загальною формулою (2) для тіла, що рухається і має відмінний від нуля імпульс.

Слід зазначити, що ніякої іншої маси, ніж маса спокою, не повинно існувати. Також хибним є поняття так званої релятивістської маси $m_{\text{рел}}$, яка аномально зростає з наближенням швидкості $\vec{v}$ тіла (елементарної частинки) до швидкості світла c відповідно до формули

$$m_{\text{рел}} = \frac{m}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (3)$$

Насправді, відповідно до перетворень Гендріка Лоренца (Lorentz et al., 1935) аномально збільшуються повна енергія E та імпульс $\vec{p}$ тіла, що рухається з великою швидкістю, тоді як маса тіла m залишається незмінною і дорівнює масі спокою. Повна енергія E у СТВ визначається наступною формулою, яку отримав Альберт Ейнштейн:

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (4)$$

Поява формули (3) для релятивістської маси пов'язана зі штучним об'єднанням у частку маси спокою m в чисельнику та величини $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ у знаменнику формули (4). Для такого об'єднання відсутні будь-які розумні підстави. Дійсно, поява множника $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ є прямим наслідком чотиривимірного перетворення Лоренца для координат x, y, z і часу t , а також аналогічного перетворення для чотиривимірного вектора імпульсу $\vec{p}$ та енергії E . Формула (3) для релятивістської маси $m_{\text{рел}}$ суперечить вимогам лоренц-інваріантності (тобто незмінності при перетвореннях Лоренца внаслідок переходу від одної інерціальної системи до іншої). Ця формула демонструє абсолютно протилежне, а саме: зміну маси під час переходу від одної інерціальної системи до іншої. Як було вже зазначено, маса тіла внаслідок перетворень Лоренца залишається рівною масі спокою, тобто є скалярним інваріантом у процесі цих перетворень.

Слід зазначити, що Альберт Ейнштейн у своїх працях про зв'язок енергії E та маси m не використовував формулу (2). Це твердження, як і висновок щодо справедливості формули Ейнштейна (1), лише для стану спокою, скоріше за все вперше висловив автор статті (Okun, 1989, p. 31) (див. також відповідні посилання в цій оглядовій публікації).

Маса двофотонного комплексу, закон збереження маси в діагностичному методі ПЕТ. Важлива проблема визначення маси системи двох фотонів за умови відсутності маси спокою у кожного із цих фотонів була досліджена авторами статті (Gabovych, A.M., & Gabovych, N., 2007, p. 649). Застосування проблеми маси двофотонного комплексу до діагностичного методу ПЕТ було розпочато у статті (Чалий, & Гриценко, 2012, p. 43–46) і продовжено в цій презентації.

Беручи до уваги умови адитивності енергії та імпульсів для системи із двох фотонів, релятивістську формулу (2) для маси спокою m_{12} двофотонного комплексу можна представити за допомогою такої формули:

$$m_{12} = \sqrt{(E_1 + E_2)^2/c^4 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2/c^2}. \quad (5)$$

Розглянемо **перший випадок**, коли вектори різних за величиною імпульсів обох фотонів паралельні, тобто справедливі такі формули: $\vec{p}_1 = p_1\vec{n}_1$, $\vec{p}_2 = p_2\vec{n}_2$, причому одиничні вектори $\vec{n}_1$ і $\vec{n}_2$, які задають напрямок руху фотонів, паралельні між собою, тобто $\vec{n}_1 = \vec{n}_2 = \vec{n}$. Тоді, на підставі зв'язку $E = c|\vec{p}|$ між енергією та модулем імпульсу фотона, маємо такий результат для квадрата суми імпульсів двох фотонів в другому доданку формули (5):

$$(\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2 = (E_1 + E_2)^2/c^2. \quad (6)$$

Звідси випливає, що другий від'ємний доданок точно дорівнює першому додатному доданку під квадратним коренем формули (5). У результаті маємо такий висновок: **за умови паралельності векторів імпульсів обох фотонів відсутня не тільки маса спокою кожного окремого фотона, але відсутня й маса спокою всього двофотонного комплексу ($m_{12} = 0$).**

Перейдемо до розгляду **другого випадку**, коли два фотони мають різні за модулем, але (на відміну від першого випадку) антипаралельні за напрямком вектори імпульсів, тобто $\vec{n}_1 = -\vec{n}_2$. У результаті, враховуючи додаткові співвідношення, маємо

$$\begin{aligned} \vec{p}_1 &= p_1\vec{n}_1 = (E_1/c)\vec{n}_1, \quad \vec{p}_2 = p_2\vec{n}_2 = (E_2/c)\vec{n}_2 = \\ &= -(E_2/c)\vec{n}_1, \quad (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2 = (E_1 - E_2)^2/c^2, \end{aligned} \quad (7)$$

формула (5) для маси двофотонного комплексу набуває вигляду

$$m_{12} = 2\sqrt{E_1 E_2}/c^2. \quad (8)$$

Вираз (8) дає всі підстави стверджувати: **у випадку, коли два фотони мають різні за модулем і антипаралельні за напрямком вектори імпульсів, маса m_{12} відмінна від нуля.**

І нарешті, розглянемо **третій випадок**, який саме і реалізується в діагностичному методі ПЕТ, коли високоенергетичні фотони електромагнітного випромінювання гамма-діапазону мають однакові за модулем та антипаралельні за напрямком вектори імпульсів, тобто $|\vec{p}_1| = |\vec{p}_2|$ та $\vec{n}_1 = -\vec{n}_2$. У цьому випадку, врахуючи формулу Макса Планка для однакової енергії обох квантів $E_1 = E_2 = h\nu$, маса двофотонного комплексу в методі ПЕТ дорівнює

$$m_{12} = 2h\nu/c^2. \quad (9)$$

Беручи до уваги, що маса електронно-позитронної пари дорівнює $1,82 \cdot 10^{-30}$ кг, можна знайти із формули (9) таке значення довжини хвилі λ кожного з двох гамма-квантів (фотонів):

$$\lambda = 2h / m_{e-p}c = 2,42 \times 10^{-12} \text{ м}, \quad (10)$$

для якої маса електронно-позитронного комплексу буде точно дорівнювати масі двофотонного комплексу. Таким чином, саме в останньому випадку закон

збереження маси буде виконуватися на всіх етапах використання діагностичного методу ПЕТ.

Висновки

У презентації була досліджена важлива проблема виконання закону збереження маси при анігіляції електронно-позитронної пари в методі ПЕТ. Проведені дослідження базувались на послідовному використанні таких двох формул:

- релятивістської формули (2) для зв'язку енергії, маси та імпульсу, яка узагальнює знамениту формулу Ейнштейна $E = mc^2$, справедливу для стану спокою і нульового імпульсу;
- релятивістської формули (5) для маси двофотонного комплексу.

Для виконання закону збереження маси елементарних частинок, які беруть участь у процесі анігіляції електрона і позитрона з утворенням двох гамма-квантів у методі ПЕТ, необхідно, щоб високоенергетичні фотони електромагнітного випромінювання гамма-діапазону мали однакові за модулем та антипаралельні за напрямком вектори своїх імпульсів.

Внесок авторів: Олександр Чалий – концептуалізація, методологія, керівництво дослідженням, написання оригінального тексту; Наталія Гриценко – методологія і практичне використання в педагогіці, аналіз і перевірка даних, перегляд і редагування; Альбіна Криштопа – аналіз і перевірка даних, перегляд і редагування; Ірина Марголич – аналіз і перевірка даних, перегляд і редагування; Галина Храпійчук – аналіз і перевірка даних, перегляд і редагування, друк заключного тексту.

Список використаних джерел

- Чалий, О.В., & Гриценко, Н.Л. (2012). Історичний розвиток концепції маси в фізичних теоріях XVII–XXI ст. *Фізика та астрономія в сучасній школі*. Ч. 1, 3, 43; Ч. 2, 6, 43.
- Чалий, О.В., Агапов, Б.Т., Меленевська, А.В., Мурашко, М.І., Радченко, Н.Ф., Стучинська, Н.В., & Цехмістер, Я.В. (2001). *Медична і біологічна фізика*. Т. 2. (О.В. Чалий, Ред.). ВІПОЛ.
- Bushberg, J.T., & Seibert, J.A. (2022). *The Essential Physics of Medical Imaging*. Study Guide, LWW.
- Gabovych, A.M., & Gabovych, N. (2007). How to explain the non-zero mass of electromagnetic radiation consisting of zero-mass photons? *European Journal of Physics*, 28, 649.
- Cameron, I.R., & Skofronik, I.G. (1978). *Medical Physics*. John Wiley & Sons.
- Chalyi, A. (Ed.). (2020). *Medical and Biological Physics*. (4rd ed.). Nova Knyga.
- Chalyi, A., & Deluka, P. (1999). Fulbright program builds bridges between leading American and Ukrainian univer-sities in the study of medical physics and biomedical engineering. *Fulbright Newsletter*, 4, 8–11.
- Einstein, A. (1905). Ist die Tragheit eines Korpers von seinem Energieinhalt abh angig? *Ann. Phys.*, 18, 639–641.
- Hawking, S.W. (1988). *A Brief History of Time. From the Big Bang to Black Holes*. Bantam Books.
- Landau, L.D., & Lifshits, E.M. (1971). *The Classical Theory of Fields*. Pergamon Press.
- Landau, L.D., & Lifshits, E.M. (1976). *Mechanics*. Pergamon Press.
- Lorentz, H.A., Poincare, H., Einstein, A., & Minkowski, H. (1935). *The Principle of Relativity: Collection of Work of Classics of Relativism*.
- Okun, L. (1989). The concept of mass. *Physics Today*, 42, 31.

References

- Bushberg, J.T., & Seibert, J.A. (2022). *The Essential Physics of Medical Imaging*. Study Guide, LWW.
- Gabovych, A.M., & Gabovych, N. (2007). How to explain the non-zero mass of electromagnetic radiation consisting of zero-mass photons? *European Journal of Physics*, 28, 649.

- Chalyi, A. (Ed.). (2020). *Medical and Biological Physics*. (4rd ed.). Nova Knyga.
- Chalyi, A.V., & Grytsenko, N.L. (2012). Historical development of the concept of mass in physical theories of the XVII-XXI centuries. *Physics and astronomy at modern school*, P. 1, 3, 43; P. 2, 6, 43 [in Ukrainian].
- Chalyi, O.V., Agapov, B.T., Melenevska, A.V., Murashko, M.I., Radchenko, N.F., Stuchynska, N.V., Tsekhmister Y.V. (2001). *Medical and Biological Physics*. Vol. 2. (O.V. Chalyi, Ed.). VIPOL [in Ukrainian].
- Chalyi, A., & Deluka, P. (1999). Fulbright program builds bridges between leading American and Ukrainian universities in the study of medical physics and biomedical engineering. *Fulbright Newsletter*, 4, 8–11.
- Cameron, I.R., & Skofronik, I.G. (1978). *Medical Physics*. John Wiley & Sons.
- Einstein, A. (1905). Ist die Tragheit eines Korpers von seinem Energieinhalt abhangig? *Ann. Phys.*, 18, 639–641.
- Hawking, S.W. (1988). *A Brief History of Time. From the Big Bang to Black Holes*. Bantam Books.
- Landau, L.D., & Lifshits, E.M. (1976). *Mechanics*. Pergamon Press.
- Landau, L.D., & Lifshits, E.M. (1971). *The Classical Theory of Fields*. Pergamon Press.
- Lorentz, H.A., Poincare, H., Einstein, A., & Minkowski, H. (1935). *The Principle of Relativity: Collection of Work of Classics of Relativism*.
- Okun, L. (1989). The concept of mass. *Physics Today*, 42, 31.

Отримано редакцією збірника / Received: 22.06.24

Прорецензовано / Revised: 06.08.24

Схвалено до друку / Accepted: 01.10.24

Alexander CHALYI¹, DSc (Phys. & Math.), Prof.

ORCID ID: 0000-0002-5755-3875

e-mail: avchalyi7@gmail.com

Natalia GRYTSENKO¹, PhD (Ped.), Assoc. Prof.

ORCID ID: 0000-0001-7686-4540

e-mail: nataly812305@gmail.com

Albina KRYSHTOPIA¹, Senior Lecturer

ORCID ID: 0000-0003-1034-7342

e-mail: alla335578@gmail.com

Iryna MARGOLYCH¹, PhD (Phys. & Math.), Assoc. Prof.

ORCID ID: 0009 0000 6426 2593

e-mail: iryna.margolych@gmail.com

Halyna KHRAPIICHUK¹, PhD (Phys. & Math.), Assoc. Prof.

ORCID ID: 0009-0008-6978-5850

e-mail: halynakhrapiichuk@gmail.com

¹Bogomolets National Medical University, Kyiv, Ukraine

THE LAW OF MASS CONSERVATION IN THE METHOD OF POSITRON EMISSION TOMOGRAPHY

This presentation is devoted to an actual problem of Medical Physics, which is related to the law of mass conservation in the modern diagnostic method of positron emission tomography (PET). The theoretical basis of the PET method is based on the phenomenon of annihilation of an electron and a positron with the formation of two gamma quanta, i.e. photons of short-wave electromagnetic radiation in the gamma range. The problem is that an electron and a positron have a non-zero total rest mass, while a photon is an elementary particle that has no mass. Therefore, a natural question arises, whether there is really a

violation of the law of mass conservation in the process of electron and positron annihilation in one of the main diagnostic methods of PET, which is widely used in medical practice along with such diagnostic methods as magnetic resonance imaging (MRI) and computed tomography (CT)? The theoretical research conducted below provides a consistent and scientifically based answer to this fundamental question.

Keywords: *positron emission tomography (PET); the process of electron and positron annihilation; the limits of application of Einstein's formula $E = mc^2$; the relativistic formula for the relationship between energy, mass and momentum; the formula for the mass of a 2-photon complex; the law of conservation of mass in the PET method.*

Автори Н. Гриценко, А. Криштопа, І. Марголич, Г. Храпійчук заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Член програмного комітету О. Чалий заявляє про відсутність конфлікту інтересів та невтручання в процес оцінювання цієї статті відповідно до міжнародних стандартів публікаційної етики. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors N. Grytsenko, A. Kryshchop, I. Margolych and H. Khrapiichuk declare no conflicts of interest. The member of the Program committee A. Chalyi declares no conflict of interest and has not interfered in the evaluation process of this article, in accordance with international publication ethics standards. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

Олександр ГОРБАЧЕНКО, канд. фіз.-мат. наук

ORCID ID: 0000-0003-0563-2392

e-mail: gorbachenko@knu.ua

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Володимир ПЛЮЙКО, д-р фіз.-мат. наук, проф.

ORCID ID: 0000-0003-3668-1306

e-mail: plujko@knu.ua

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

АНАЛІЗ НЕОДНОЗНАЧНОСТЕЙ ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРЕРІЗІВ УТВОРЕННЯ РАДІОІЗОТОПІВ ^{99m}Tc , ^{177}Lu

Проведено порівняння експериментальних даних значень перерізів утворення медичних радіоізоотопів ^{99m}Tc , ^{177}Lu у фотоядерних реакціях $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo} (^{99}\text{Mo} \xrightarrow{\beta} ^{99m}\text{Tc})$, $^{178}\text{Hf}(\gamma, p)^{177}\text{Lu}$ з оціненими даними та розрахунками, виконаними з урахуванням невизначеностей характеристик збуджених станів атомних ядер. Експериментні дані з бази даних EXFOR наведено з достатньо великими похибками, а сучасні дані з бібліотеки даних TENDL2023, оцінені за багатьох енергій, не узгоджуються з експериментальними даними. Тому для надійного визначення відповідних перерізів фотопоглинання, які визначають виробництво радіоізоотопів, було виконано обчислення відповідних перерізів з урахуванням невизначеностей у характеристиках збуджених станів ядер, а саме, у типі фотонної силової функції, яка визначає ймовірність гамма-розпаду та фотопоглинання ядер, і у виразах для густин збуджених станів атомних ядер. Продемонстровано досить сильну залежність значень перерізів утворення радіоізоотопів від характеристик станів, але ніякою варіацією параметрів не можна узгодити теоретичні розрахунки з експериментальними даними по перерізу утворення радіоізоотопу ^{177}Lu . Наведено розрахунки перерізів фотопоглинання ядер ^{100}Mo , ^{178}Hf із різними деформаціями при використанні систематик для гігантських дипольних резонансів.

Ключові слова: перерізи фотоядерних реакцій, радіоізоотопи ^{99m}Tc , ^{177}Lu , фотонна силова функція, пігмі та гігантський дипольні резонанси.

Вступ

Електромагнітні переходи відіграють значну роль в ядерних процесах, оскільки вони супроводжують будь-яку ядерну реакцію, а властивості ядра можна оцінити, досліджуючи електромагнітні переходи. Усереднені ймовірності фотопоглинання та гамма-розпаду описуються за допомогою фотонних силових функцій (ФСФ) (Capote et al., 2009; Goriely, & Plujko, 2019; Goriely et al., 2019; Plujko, Capote, & Gorbachenko, 2011; Plujko et al., 2018), які використовуються як для фундаментальних досліджень атомних ядер, так і в прикладних застосуваннях. Електричні дипольні (E1) переходи домінують над переходами іншого типу і мультипольностей, коли вони відбуваються одночасно (Capote et al., 2009; Plujko, Capote, & Gorbachenko, 2011). Основним колективним станом, який визначає E1 фотопоглинання і гамма-розпад

© Горбаченко Олександр, Плюйко Володимир, 2024

атомних ядер за енергій збудження ≤ 50 MeV, є гігантський ізовекторний дипольний резонанс (ГДР). Поряд з ним може збуджуватися і пігмі дипольний резонанс, який може сильно впливати на перерізи фотоядерних реакцій.

Деякі радіоізотопи, зокрема такі, як: ^{99m}Tc , ^{47}Sc , ^{44}Ti , ^{67}Cu , ^{103}Pd , ^{117m}Sn , ^{169}Er , ^{195m}Pt , ^{225}Ac , ^{177}Lu , можуть бути отримані у фотоядерних реакціях під час взаємодії з високо інтенсивними γ -квантами з кращим виходом, ніж у різних класичних методах (Habs, & Koster, 2011; Naik et al., 2013; Nikiforov, & Uvarov, 2010; Gao et al., 2023). Детальні дослідження щодо виробництва таких ізотопів досліджувались у різних роботах (Habs, & Koster, 2011; Naik et al., 2013; Nikiforov, & Uvarov, 2010; Gao et al., 2023). Особливий інтерес представляє виробництво ізотопів ^{99m}Tc , ^{177}Lu , які є бета-випромінювачами низької енергії з періодом піврозпаду 6,0 та 6,65 діб, відповідно. Через малу енергію бета-частинок глибина проникнення в м'які тканини мала, тому високі дози можуть бути отримані в малих об'ємах і ці ізотопи є ідеальними кандидатами для ендорадіотерапії. Процес виробництва цих ізотопів може бути налагоджений за допомогою високоенергетичного гамма-випромінювання в ядерних реакціях $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo} (^{99}\text{Mo} \xrightarrow{\beta} ^{99m}\text{Tc})$, $^{178}\text{Hf}(\gamma, p)^{177}\text{Lu}$. Для реалізації таких ядерних реакцій необхідно, зокрема, знати точне оцінювання їхніх перерізів.

Мета роботи проаналізувати можливість використання фотореакцій $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$, $^{178}\text{Hf}(\gamma, p)^{177}\text{Lu}$ для виходу ізотопів ^{99m}Tc , ^{177}Lu та оцінити вплив невизначеностей перерізів відповідних ядерних реакцій від модельних передбачень.

Розглянемо генерацію радіоізотопів ^{99m}Tc , ^{177}Lu за допомогою гамма-квантів з ядерних реакцій $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$, $^{178}\text{Hf}(\gamma, p)^{177}\text{Lu}$. Зазвичай як ефективність генерації радіоізотопів використовують відношення активності згенерованих радіоізотопів A до загальної маси мішені m при опроміненні гамма-квантами однієї енергії з густиною потоку Φ (Habs, & Koster, 2011), прирівнюючи максимальні кількості ізотопів, які можна згенерувати:

$$\frac{A}{m} = \frac{N_A}{M} \cdot (1 - \exp(-t_{irr} \cdot \ln 2 / T_{1/2})) \cdot \sigma \cdot \Phi, \text{ і враховуючи те, що вони розпадаються}$$

$$\text{під час максимального виходу згенерованих ізотопів} \quad \left(\frac{A}{m} \right)_{\max} = \frac{N_A \cdot \ln 2}{M \cdot T_{1/2}},$$

де M – молярна маса ізотопів мішені (г/моль), N_A – число Авогадро, t_{irr} – час опромінення, $T_{1/2}$ – період піврозпаду напрацьованого радіоізоотопу, за достатньо довгих часів опромінення, прирівнюючи швидкість виробництва і розпаду ізотопів за максимальної активності, отримуємо зв'язок перерізу реакції і густини потоку $\sigma \cdot \Phi \approx \ln 2 / T_{1/2}$. Оскільки періоди $T_{1/2}$ для наших радіоізотопів становлять приблизно 6 діб, то потоки, потрібні для генерації даних ізотопів, будуть визначатись перерізами реакцій

$$\Phi [\text{cm}^{-2} \times \text{s}^{-1}] \approx \ln 2 / (\sigma \cdot T_{1/2}) \approx (1.2 \div 1.3) \cdot 10^{18} / \sigma [\text{barn}].$$

У роботі (Habs, & Koster, 2011) представлено оцінювання виходу ізотопу ^{99m}Tc за енергії 14 MeV і показано, що ефективність виробництва цього ізотопу в реакції $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ краща, ніж у реакції з нейтронами. Оскільки на реакторі отримуються більш високі потоки нейтронів, то технологія виробництва ^{99m}Tc на реакторі більш прийнятна, але у зв'язку з виходом із експлуатації реакторів поділу потрібно шукати інші незалежні варіанти виробництва медичних ізотопів. Зазвичай у випадку гальмівних гамма-квантів ми маємо спектр із різних енергій гамма-квантів і добуток $\sigma \cdot \Phi$ замінюється на інтеграл $\int_{E_{\gamma, \min}}^{E_{\gamma, \max}} \sigma(E_{\gamma}) \cdot \Phi_{\gamma}(E_{\gamma}) dE_{\gamma}$, де

Φ_{γ} густина потоку за певної енергії гамма-квантів. Цей інтеграл буде залежати від поведінки перерізу та енергії гамма-квантів.

На рис. 1 представлено залежності перерізів фотоядерних реакцій $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$, $^{178}\text{Hf}(\gamma, p)^{177}\text{Lu}$ від енергії гамма-квантів, розраховані за кодами TALYS 2.0 (<https://nds.iaea.org/talys/>), EMPIRE 3.2 (<https://www-nds.iaea.org/empire/>), оцінені дані за бібліотекою TENDL2023 (https://tendl.web.psi.ch/tendl_2023/tendl2023.html) та експериментальні дані з EXFOR (<https://www-nds.iaea.org/exfor/>), які можуть бути використані для виробництва ізотопів ^{99m}Tc (після бета-розпаду $^{99}\text{Mo} \xrightarrow{\beta} ^{99m}\text{Tc}$), ^{177}Lu .

Видно, що функції збудження таких реакцій дуже сильно залежать від енергії гамма-квантів. Функція збудження для реакції $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ краще узгоджується з експериментальними даними, ніж для реакції $^{178}\text{Hf}(\gamma, p)^{177}\text{Lu}$. За малих енергій у діапазоні енергій гамма-квантів, близько до енергії відділення нейтрона (6–9 MeV) (рис. 1a), проявляються пігмі дипольні резонанси і відповідно переріз ядерних реакцій може відрізнятися в декілька разів. Також може впливати на переріз деформація ядер. Переріз реакції $\sigma(\gamma, x)$ ($x = n, p$) буде визначатись такими параметрами ядра, як фотонна силова функція (ФСФ) (параметр strength і gstrfn у TALYS і EMPIRE кодах, відповідно) та густина ядерних рівнів (ГЯР) (параметри ldmodel і levden у TALYS і EMPIRE кодах, відповідно). Були використані такі моделі для ГЯР у коді TALYS: ldmodel = 1 – модель Гілберта–Камерона з постійною температурою; ldmodel = 2 – модель фермі-газу зі зворотним зсувом; ldmodel = 3 – узагальнена надплинна модель; ldmodel = 4 – метод Хартрі–Фока–Боголюбова із силами Скірма. Як моделі для ФСФ були використані: strength = 1 – модель Копецького та Ула; strength = 2 – модель стандартного лоренціана (SLO); strength = 9 – модель модифікованого лоренціана (SMLO). Для ГЯР у коді EMPIRE були використані такі моделі: levden = 0 – специфічна для EMPIRE густина ядерних рівнів, узгоджена з RIPL-3 експериментальними відстанями між нейтронними резонансами D_{obs} та кумулятивною кількістю дискретних рівнів N_{cum} (EGSM модель за замовчуванням); levden = 1 – узагальнена надплинна модель Generalized Superuid Model (GSM), підігнана за RIPL D_{obs} ; levden = 2 – модель Гілберта–Камерона (Gilbert–Cameron) із RIPL D_{obs} та N_{cum} ; levden = 3 – RIPL-3 Хартрі–

Фок–Боголюбов (Hartree–Fock–Bogolyubov (HFB)) густина ядерних рівнів. А як моделі для ФСФ були використані: gstrfn = 0 – модель підсиленого узагальненого лоренціана (EGLO); gstrfn = 6 – модель стандартного лоренціана (SLO), gstrfn = 1 – модель модифікованого лоренціана (MLO).

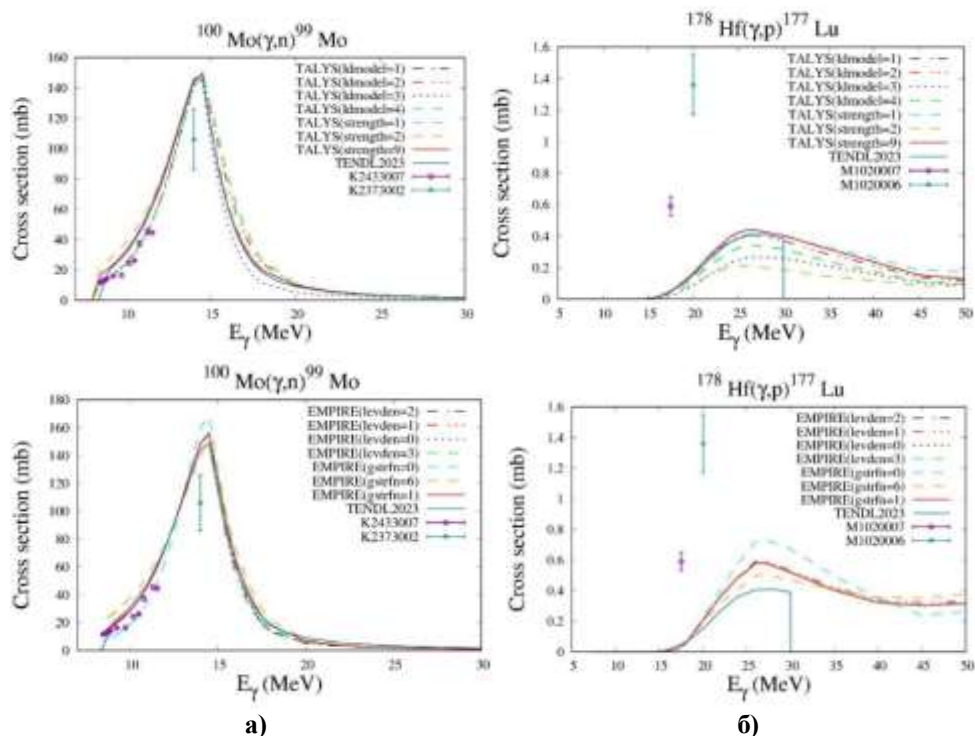


Рис. 1. Залежність перерізів ядерних реакцій

$^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$, $^{178}\text{Hf}(\gamma, p)^{177}\text{Lu}$ від енергії гамма-квантів.

(Експериментальні дані взяті з бази даних EXFOR

із відповідними subent-номерами: K2433007; K2373002; M1020007; M1020006)

Обчислення інтеграла $\int_{E_{\gamma, \min}}^{E_{\gamma, \max}} \sigma(E_{\gamma}) \cdot \Phi_{\gamma}(E_{\gamma}) dE_{\gamma}$ для Φ_{γ} густини потоку

гальмівного випромінювання з енергією електронів 11 MeV із різними виразами для густин ядерних рівнів та ФСФ, що представлені на рис. 1, показують розходження між собою в два рази. Якщо переріз ядерної реакції йде через складене ядро, то можна очікувати, що парціальний переріз $\sigma(\gamma, x)$ буде пропорційний повному перерізу фотопоглинання $\sigma(\gamma, abs)$:

$$\sigma_{abs}(E_{\gamma}) = \sigma_{E1, GDR}(E_{\gamma}) + \sigma_{qd}(E_{\gamma}),$$

де $\sigma_{E1, GDR}$ – компонента перерізу фотопоглинання пов'язана зі збудженням ГДР;

$\sigma_{qd}(E_{\gamma})$ – квазідейтронний внесок у переріз фотопоглинання, який взято

згідно з (Chadwick et al., 1991). Повний переріз фотопоглинання можна обчислити, користуючись фотонними силовими функціями (Capote et al., 2009; Plujko, Capote, & Gorbachenko, 2011; Plujko et al., 2018) для електричних дипольних (E1) переходів з урахуванням гігантського та пігмі дипольними резонансами, а також деформаціями атомних ядер. Наприклад, компонент перерізу фотопоглинання, що пов'язаний зі збудженням стану ГДР $\sigma_{E1,GDR}$ розраховується з використанням різних аналітичних моделей E1 ФСФ фото збудження $\tilde{f}_{E1}^{\alpha}(E_{\gamma})$, де індексом α позначено модель ФСФ ($\alpha = \text{SLO, SMLO}$):

$$\sigma_{E1}^{\alpha}(E_{\gamma}) = \sigma_{E1,GDR}^{\alpha}(E_{\gamma}) = 3(\pi\hbar c)^2 E_{\gamma} \tilde{f}_{E1}^{\alpha}(E_{\gamma}).$$

Параметри ГДР, а також параметри квадрупольної деформації ядер β , були знайдені з підгонки експериментальних даних за фотопоглинанням з використанням моделей ФСФ стандартного SLO і модифікованого SMLO (Plujko et al., 2018; Goriely, & Plujko, 2019) лоренціанів у наближенні аксіально деформованих ядер (Capote et al., 2009; Plujko, Capote, & Gorbachenko, 2011; Plujko et al., 2018; Goriely, & Plujko, 2019).

Таблиці значень параметрів ГДР з оцінками їх невизначеності (стандартне відхилення на одну сигму) у наближенні аксіальної деформації ядер з параметром деформації β були отримані в роботі (Plujko et al., 2018), яка виконувалась в рамках проєкту МАГАТЕ "Updating the Photonuclear Data Library and generating a Reference Database for Photon Strength Functions 2016–2019" (<https://www-nds.iaea.org/CRP-photonuclear/>). Параметри деформацій β визначались із характеристик ГДР відповідно до формули Даноса (Danos, 1958), як: $\beta = \sqrt{4\pi/5}(1 - E_a/E_b) / (0.867 \cdot E_a/E_b + 1/2)$, де E_a і E_b енергії мод ГДР резонансів уздовж та поперек відносних півосей еліпсоїда обертання, відповідно. Значення E_a , E_b визначались за енергіями ГДР першого та другого резонансів $E_{r,1}$, $E_{r,2}$ (Plujko et al., 2018) згідно зі значенням сил S_1 , S_2 : якщо $S_1 < S_2$, тоді $E_a = E_{r,1}$, $E_b = E_{r,2}$ – ядро витягнуте ($\beta > 0$); якщо $S_1 > S_2$, тоді $E_b = E_{r,1}$, $E_a = E_{r,2}$ – ядро сплюснуте ($\beta < 0$). Відповідно деформації та їхні похибки в дужках, отримані методом перенесення похибок, представлено в табл. 1 для параметрів ГДР, розрахованих за допомогою моделей SMLO, SLO. Параметри квадрупольних деформацій для ядер ^{100}Mo , ^{178}Hf , отримані в різних підходах, представлено в табл. 1.

Таблиця 1

Параметри квадрупольної деформації визначені SLO, SMLO і різних бібліотек

Елемент	SLO	SMLO	"deflib.dat" (Capote et al., 2009)	(Yushkov, 1993)
^{100}Mo	0	0	0.249	0.0806
^{178}Hf	-0.26 (3)	-0.24 (3)	0.259	0.262

Різниця в значеннях і знаках деформацій призводить до невизначеностей у поведінці розрахованих повних перерізів фотопоглинання, що продемонстровано на рис. 2 для реакцій $^{100}\text{Mo}(\gamma, \text{abs})$, $^{178}\text{Hf}(\gamma, \text{abs})$. Тут продемонстровано розрахунок повних перерізів фотопоглинання з різними значеннями квадрупольних деформацій, визначеними з різних бібліотек (Pritychenko et al., 2016; Raman, Nestor, & Tikkanen, 2001; Yushkov, 1993) та розрахованих за параметрами ГДР. Параметри ГДР визначались за систематиками. Із рис. 2 видно, що для коректного опису експериментальних даних у діапазоні енергії відділення нейтрона треба враховувати внесок пігмі дипольного резонансу, оскільки моделі SLO, SMLO не дуже гарно описують експериментальні дані в цьому діапазоні.

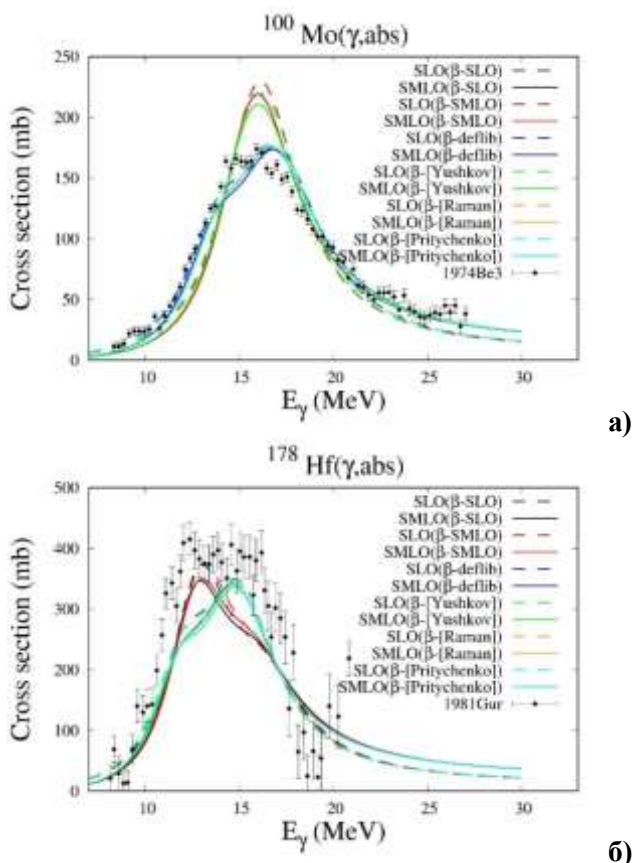


Рис. 2. Залежність перерізів ядерних реакцій $^{100}\text{Mo}(\gamma, \text{abs})$, $^{178}\text{Hf}(\gamma, \text{abs})$ від енергії гамма-квантів.

(Експериментальні дані взято з (Plujko et al., 2018) і представлено на <https://www-nds.iaea.org/PSFdatabase/>)

Висновки

Показано, що при виробництві таких радіоізотопів, як ^{99m}Tc , ^{177}Lu , у реакціях фотопоглинання $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo} (^{99}\text{Mo} \xrightarrow{\beta} ^{99m}\text{Tc})$, $^{178}\text{Hf}(\gamma, p)^{177}\text{Lu}$ існує сильна неузгодженість із розрахованими, оціненими та експериментальними даними, особливо для реакції виробництва ^{177}Lu . Причиною неузгодженостей може бути наявність пігми дипольного резонансу та неузгодженості у використанні модельних значень параметрів деформації, що відповідають наближенню аксіально деформованого ядра. На сьогодні розробляються рекомендації щодо опису фотонних силових функцій для радіоізотопів з урахуванням деформацій, що відповідають опису фотопоглинання та впливу пігми дипольного резонансу.

Внесок авторів: Олександр Горбаченко – проведення розрахунків, аналіз розрахунків, підготовка чернетки рукопису; Володимир Плюйко – аналіз розрахунків та консультування щодо розрахунків, редагування рукопису.

Подяки, джерела фінансування. Робота виконана в рамках бюджетної теми "Комплексні дослідження властивостей і механізмів взаємодії частинок з атомними ядрами для фундаментальних і прикладних застосувань" № ДР 0122U001955 та за часткової підтримки гранта НФД України 2023.05/0024.

Список використаних джерел

- Capote, R., Herman, M., Oblozinsky, P., Young, P.G., Goriely, S., Belgia, T., Ignatyuk, A.V. et al. (2009). RIPL – Reference Input Parameter Library for Calculation of Nuclear Reactions and Nuclear Data Evaluations. *Nucl. Data Sheets*, 110, 3107. <https://www-nds.iaea.org/RIPL-3/>
- Chadwick, M.B., Oblozinsky, P., Hodgson, P.E. & Reffo, G. (1991). Pauli-blocking in the quasideuteron model of photoabsorption, *Phys. Rev. C.*, 44, 814. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.44.814>
- Danos, M. (1958). On the long-range correlation model of the photonuclear effect. *Nuclear Physics*, 5, 23. [https://doi.org/10.1016/0029-5582\(58\)90005-1](https://doi.org/10.1016/0029-5582(58)90005-1)
- Gao, X., Zhang, P., Li, J. et al. (2023). Production of ^{99}Mo via photoneutron reaction using a 50 MeV electron linear accelerator. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 332, 3037–3045. <http://dx.doi.org/10.1007/s10967-023-09003-2>
- Goriely, S., & Plujko, V. (2019). Simple empirical E1 and M1 strength functions for practical applications. *Phys. Rev. C.*, 99(1), 014303. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.99.014303>
- Goriely, S., Dimitriou, P., Wiedeking, M. et al. (2019). Reference database for photon strength functions. *Eur. Phys. J. A.*, 55, 172. <https://doi.org/10.1140/epja/i2019-12840-1>
- Habs, D., & Koster, U. (2011). Production of medical radioisotopes with high specific activity in photonuclear reactions with γ -beams of high intensity and large brilliance. *Applied Physics B*, 103, 501–519.
- Naik, H., Suryanarayana, S., Jagadeesan, K., Thakare, S., Joshi, P., Nimje, V., Mittal, K., Goswami, A., Venugopal, V., & Kailas, S. (2013). An alternative route for the preparation of the medical isotope ^{99}Mo from the $^{238}\text{U}(\gamma, f)$ and $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)$ reactions. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 295, 807–816.
- Nikiforov, V.I., & Uvarov, V.L. (2010). Estimation of the photonuclear yield of isotopes in production targets. *Radiochemistry*, 52(3), 315–321. <https://doi.org/10.1134/s1066362210030161>
- Plujko, V.A., Capote, R., & Gorbachenko, O.M. (2011). Giant Dipole Resonance Parameters with Uncertainties from Photonuclear Cross Sections. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 97, 567–589. <https://doi.org/10.1016/j.adt.2011.04.001>

Plujko, V.A., Gorbachenko, O.M., Capote, R., & Dimitriou, P. (2018). Giant dipole resonance parameters of ground-state photoabsorption: Experimental values with uncertainties. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 123-124. <https://doi.org/10.1016/j.adt.2018.03.002>

Pritychenko, B., Birch, M., Singh, B., & Horoi, M. (2016). Tables of E2 transition probabilities from the first 2^+ states in even-even nuclei. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 107, 1. <https://doi.org/10.1016/j.adt.2015.10.001>

Raman, S., Nestor, C.W., & Tikkanen, P. (2001). Transition probability from the ground to the first-excited 2^+ state of even-even nuclides. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 78, 1, 1. <https://doi.org/10.1006/adnd.2001.0858>

Yushkov, A.V. (1993). Surface of $\beta(Z, N)$ Deformation for Nuclei with Z from 2 to 102. *Phys. Elem. Part. At. Nucl. (PEPAN)*, 24, 348–408.

References

Capote, R., Herman, M., Oblozinsky, P., Young, P.G., Goriely, S., Belgia, T., Ignatyuk, A.V. et al. (2009). RIPL – Reference Input Parameter Library for Calculation of Nuclear Reactions and Nuclear Data Evaluations. *Nucl. Data Sheets*, 110, 3107. <https://www-nds.iaea.org/RIPL-3/>

Chadwick, M.B., Obloinský, P., Hodgson, P.E. & Reffo, G. (1991). Pauli-blocking in the quasideuteron model of photoabsorption. *Phys. Rev. C*, 44, 814. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.44.814>

Danos, M. (1958). On the long-range correlation model of the photonuclear effect. *Nuclear Physics*, 5, 23. [https://doi.org/10.1016/0029-5582\(58\)90005-1](https://doi.org/10.1016/0029-5582(58)90005-1)

Gao, X., Zhang, P., Li, J. et al. (2023). Production of ^{99}Mo via photoneutron reaction using a 50 MeV electron linear accelerator. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 332, 3037–3045. <http://dx.doi.org/10.1007/s10967-023-09003-2>

Goriely, S., & Plujko, V. (2019). Simple empirical E1 and M1 strength functions for practical applications. *Phys. Rev. C*, 99(1), 014303. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.99.014303>

Goriely, S., Dimitriou, P., Wiedeking, M. et al. (2019). Reference database for photon strength functions. *Eur. Phys. J. A*, 55, 172. <https://doi.org/10.1140/epja/i2019-12840-1>

Habs, D., & Koster, U. (2011). Production of medical radioisotopes with high specific activity in photonuclear reactions with γ -beams of high intensity and large brilliance. *Applied Physics B*, 103, 501–519.

Naik, H., Suryanarayana, S., Jagadeesan, K., Thakare, S., Joshi, P., Nimje, V., Mittal, K., Goswami, A., Venugopal, V., & Kailas, S. (2013). An alternative route for the preparation of the medical isotope ^{99}Mo from the $^{238}\text{U}(\gamma, f)$ and $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)$ reactions. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 295, 807–816.

Nikiforov, V.I., & Uvarov, V.L. (2010). Estimation of the photonuclear yield of isotopes in production targets. *Radiochemistry*, 52(3), 315–321. <https://doi.org/10.1134/s1066362210030161>

Plujko, V.A., Capote, R., & Gorbachenko, O.M. (2011). Giant Dipole Resonance Parameters with Uncertainties from Photonuclear Cross Sections. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 97, 567–589. <https://doi.org/10.1016/j.adt.2011.04.001>

Plujko, V.A., Gorbachenko, O.M., Capote, R., & Dimitriou, P. (2018). Giant dipole resonance parameters of ground-state photoabsorption: Experimental values with uncertainties. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 123-124. <https://doi.org/10.1016/j.adt.2018.03.002>

Pritychenko, B., Birch, M., Singh, B., & Horoi, M. (2016). Tables of E2 transition probabilities from the first 2^+ states in even-even nuclei. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 107, 1. <https://doi.org/10.1016/j.adt.2015.10.001>

Raman, S., Nestor, C.W., & Tikkanen, P. (2001). Transition probability from the ground to the first-excited 2^+ state of even-even nuclides. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 78, 1, 1. <https://doi.org/10.1006/adnd.2001.0858>

Yushkov, A.V. (1993). Surface of $\beta(Z, N)$ Deformation for Nuclei with Z from 2 to 102. *Phys. Elem. Part. At. Nucl. (PEPAN)*, 24, 348–408.

Отримано редакцією збірника / Received: 02.07.24

Прорецензовано / Revised: 05.08.24

Схвалено до друку / Accepted: 01.10.24

Oleksandr GORBACHENKO, PhD (Phys. & Math.)

ORCID ID: 0000-0003-0563-2392

e-mail: gorbachenko@knu.ua

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Volodymyr PLUJKO, DSc (Phys. & Math.), Prof.

ORCID ID: 0000-0003-3668-1306

e-mail: plujko@knu.ua

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

ANALYSIS OF AMBIGUITIES IN THE DETERMINATION OF CROSS SECTIONS OF THE RADIOISOTOPES ^{99m}Tc , ^{177}Lu FORMATION

Experimental data on cross-section values of the formation of medical radioisotopes ^{99m}Tc , ^{177}Lu in photonuclear reactions $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo} (^{99}\text{Mo} \xrightarrow{\beta} ^{99m}\text{Tc})$, $^{178}\text{Hf}(\gamma, p)^{177}\text{Lu}$ are compared with evaluated data and calculations made taking into account uncertainties in the characteristics of excited states of atomic nuclei. The experimental data from the EXFOR database are given with sufficiently large uncertainties, and modern evaluated data from the TENDL2023 data library at many energies do not agree with the experimental data. Therefore, in order to reliably determine the corresponding photoabsorption cross-sections that determine the production of radioisotopes, in this work calculations of the corresponding cross-sections were performed taking into account the uncertainties in the characteristics of excited states of nuclei, namely in the form of photon strength function that determines the probability of gamma decay and photoabsorption of nuclei, and in expressions for the densities of excited states of atomic nuclei. A rather strong dependence of the values of the radioisotope formation cross sections on the characteristics of the states has been demonstrated, but no variation of the parameters can agree the theoretical calculations with the experimental cross section data for the formation of ^{177}Lu radioisotope. Calculations of photoabsorption cross sections of ^{100}Mo , ^{178}Hf nuclei with different deformations utilizing systematics for giant dipole resonances are shown.

Key words: *photonuclear reaction cross sections, radioisotopes ^{99m}Tc , ^{177}Lu , photon strength function, pygmy and giant dipole resonances.*

Автори О. Горбаченко та В. Плюйко заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors O. Gorbachenko and V. Plujko declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

Віктор ЧЕРНЯК, д-р мед. наук, проф.

ORCID ID: 0000-0001-8424-4691

e-mail: victorchernyak.ohta@gmail.com

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Костянтин КАРПЕНКО, д-р філософії

ORCID ID: 0000-0002-9737-4484

e-mail: zushpre@gmail.com

Національний військово-медичний клінічний центр
"Головний військовий клінічний госпіталь", Київ, Україна

РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ ВИЯВЛЕННЯ НЕРЕНТГЕНОКОНТРАСТНИХ УЛАМКІВ У ПОРАНЕНИХ ПІСЛЯ ВОГНЕПАЛЬНИХ ПОРАНЕНЬ

Вступ. *Оскільки часто поранення відбувається не тільки рентгеноконтрастними осколками та кулями, то діагностика положення сторонніх тіл у рановому каналі або в порожнині пацієнта стає ускладненою. В умовах сучасного конфлікту використовуються нові типи зброї та уражуючих снарядів, нові матеріали, зокрема модифікації пластику все частіше використовують як кулі, оболонки снарядів, гранат наступального та оборонного типу. Усе частіше стикаємось з випадками осколкового ураження м'яких тканин пластиковими та скляними елементами. Пластик, потрапляючи в м'які тканини людського тіла, має властивості сердечників розривних куль, значно збільшуючи розмір пульсуючої порожнини ранового каналу. У той же час спроможність пластику та скла дробитися в тілі може вимагати розкриття ран для обробки та вилучення цих сторонніх предметів, що збільшує травматичність і подовжує термін реабілітації пацієнтів. Пошук осколка, особливо нерентгеноконтрастного, у каналі рани часто складний і тривалий, що пов'язано з недостатньою його візуалізацією, зміною нормальної анатомії при вогнепальних пораненнях і складністю хірургічного пошуку.*

Висновки. *Отже, пошук простих та надійних засобів діагностики сторонніх предметів у тілі пацієнта (без використання рентген-апаратів) у польових умовах є актуальним та надзвичайно важливим завданням сьогодення, вирішення якого здатне зберегти життя і здоров'я тисячам пораниених.*

Ключові слова: *передумови, розробка, пристрій, виявлення, уламки, вогнепальні поранення.*

Вступ

Основний метод, що використовується в сучасній медицині для знаходження осколків – це діагностика, яка не передбачає прямого контакту із самим осколком. Методи виявлення спрямовані на взаємодію через тканини людини з використанням таких властивостей осколків, як: феромагнітність, рентгеноконтрастність тощо (Gumeniuk et al., 2021). Таким чином, осколки, що не мають відповідних властивостей, складно виявляти (Baum et al., 2022; Charles, Geusens, & Nys, 2023; Paolucci, & Diaczuk, 2023; Tsymbaliuk et al., 2023; Wang et al., 2023). Це може бути скло, пластик, композити тощо (Fountain et al., 2021;

© Черняк Віктор, Карпенко Костянтин, 2024

Wang et al., 2023). Враховуючи особливості ранового каналу, пристрій, який вводиться в тіло людини, має бути достатньо гнучким для введення в рану з мінімальними пошкодженнями. Окрім того, пристрій необхідно робити одноразовим, щоб мінімізувати вірогідність потрапляння в рану інфекції, забруднення і крові інших людей. Також пристрій має бути здатним сканувати й бічні стінки каналу.

Метою роботи є розробка нового способу діагностики наявності в рані пацієнта сторонніх неконтрастних осколків засобами безпосереднього контакту.

Завдання роботи:

- виявити ефект від механічного контакту гнучкого зонду зі стороннім тілом у раневому каналі чи порожнині пацієнта;
- розробити принципово новий інструмент для перевірки ранових каналів;
- виявити функціональну обумовленість контрольованих сигналів від форми і типу стороннього предмета в раневому каналі;
- довести доцільність використання як параметр контрольованого сигналу його частотноамплітудні характеристики.

Для виявлення осколків використовують ефект шумової емісії. Оскільки на поверхні завжди є пошкодження і дефекти, і коли по ній провести чимось, то виникає шум. Якщо взяти і провести чимось по м'яких тканинах і твердому предмету (осколку), то на осцилограмі будуть спостерігатись значні відмінності. За рахунок такої різниці шумів можна тактильно діагностувати місце знаходження осколка.

Таким чином, наш пристрій має складатися із двох частин: 1) змінна деталь, що вводиться в поранення; 2) багаторазовий пристрій з мікрофоном для фіксації шуму і відповідним програмним забезпеченням (ПЗ) для його обробки.

За осколок візьмемо уламок пластику – модель, яку відтворено методом 3D-друку з металевого прототипу, отриманого від розриву касетного боєприпасу. Такі осколки можуть утворюватися після прошивання кулею пластикового захисного спорядження невисокого класу захисту. Розмір шматочка пластику становив 1 см на 0,5 см. За тканину людини взято шматок м'яса (імітатор), у якому зробили отвір і вставили осколок, зімітувавши таким чином осколкове поранення. Такий імітатор використано для знаходження осколка в 3D-проекції, що зможе полегшити операцію. Відповідно до положення вхідного отвору, ми можемо визначити початкову точку, а за допомогою кута нахилу – подальший рух осколка. Враховуючи місце, де ми визначили осколки, і нанісши на щуп помітки, як у лінійки, можемо доволі точно визначити місце знаходження осколка. За допомогою 3D-сканера було отримано просторову картину з'єднання демонстратора в тренажері, що дозволяло чітко визначити положення демонстратора навіть за наявності ранового каналу складної форми. У розсічених тканинах взаємодію між зондом приладу та демонстратором також оцінювали візуально за допомогою мікроскопа. Після контакту бужа з демонстратором на екрані осцилографа спостерігалася картина шумового випромінювання, піддана спектральному

аналізу на низьких і високих частотах. Отже, використаний прилад дозволив встановити середні значення амплітуд на фіксованих частотах, ширину спектра, основні частоти та гармоніки для конкретних умов контакту. Положення демонстратора фіксувалося на розгортці по часовій осі, що дозволяло визначити його положення перед видаленням. Використовуючи 3D-модель симулятора, кут та довжину входу зонду можна було чітко визначити розташування осколка в тілі. Після цього імітатор розсікали скальпелем і пінцетом видаляли фрагмент.

Однією з найважливіших складових успішного лікування поранених є повний контроль над болем різної інтенсивності. У випадку слабого болю за візуальною аналоговою шкалою (ВАШ 10–40 мм) застосовуємо: Інфулган, Кейдекс. Якщо біль середньої інтенсивності (ВАШ 40–70 мм), застосовуємо: Інфулган, Кейдекс, Ропілонг – зі швидкістю 6–16 мл/год через епідуральний катетер. У випадку сильного болю (ВАШ 70–100 мм) застосовуємо: Інфулган, Кейдекс, Ропілонг – зі швидкістю 6–16 мл/год через епідуральний катетер, Налбуфін. Також рекомендовано застосовувати Юмерокс® Інгал – індивідуальний пристрій, що призначений для інгаляційного введення Метоксифлурану. Для реалізації зазначених теоретичних положень скористаємося програмою статистичної обробки експериментальних даних "StargraphicCENTURION". Ця програма дозволяє на основі внесених у вигляді електронних таблиць даних експериментів виконувати увесь необхідний комплекс статистичної обробки даних і, використовуючи певні критерії подібності (*t*-критерій Стьюдента, *G*-критерій Кохрена, критерій Пірсона), робити висновок щодо значущості прийнятих гіпотез, законів розподілу величин та іншого.

Розглянемо найпоширеніші методи знаходження осколків в організмі людини в умовах польової хірургії.

Рентгенографія є одним із найпоширеніших видів діагностики. В основі формування рентгенівського зображення досліджуваного органу лежить неоднорідне поглинання випромінювання тканинами, а також сторонніми тілами, через що відбувається ослаблення освітленості плівки на різних ділянках. Підсумковий ефект у променевій діагностиці полягає в нашаруванні зображень одних органів і тканин на інші, що ускладнює об'єктивну та якісну діагностику патологічних процесів. У рентгенодіагностиці відбувається нашарування різних органів, розташованих на шляху рентгенівського променя.

Комп'ютерна томографія (КТ) – це діагностичний метод, який можна назвати вдосконаленою рентгенографією. Як і традиційний рентген комп'ютерна томографія забезпечує зображення за допомогою рентгенівських променів. Однак його конструкція дозволяє сканувати органи багатошаровим методом, що дає дуже детальну картинку з високою просторовою роздільною здатністю. А додаткова комп'ютерна обробка зображення дозволяє візуалізувати внутрішні органи чи структуру не просто як набір зрізів, а як тривимірні зображення, де проблемну зону можна оглянути з усіх боків. Комп'ютерну томографію можна проводити без контрасту або з введенням

контрастної речовини відповідно до конкретного клінічного завдання, поставленого перед рентгенологом. Завдяки об'ємному скануванню локалізацію осколка можна визначити набагато точніше, ніж на рентгенівському знімку, похибка відстані під час таких досліджень становить близько 1 мм. Крім того, завдяки можливості введення контрастної речовини можна знайти не тільки уламки заліза, а й уламки інших матеріалів. Однак слід пам'ятати, що найчастіше як контрастну речовину використовують йодовмісні засоби, тому можлива алергія. Для проведення такого обстеження обов'язкова проба на переносимість.

Магнітно-резонансна томографія (МРТ) – томографічний метод дослідження внутрішніх органів і тканин із застосуванням фізичного явища ядерного магнітного резонансу. Метод заснований на вимірюванні електромагнітного відгуку атомних ядер, найчастіше ядер атомів водню, а саме на їх збудженні за допомогою певної комбінації електромагнітних хвиль у постійному магнітному полі високої напруженості. Це неінвазивний метод медичного обстеження, який широко використовується в медичній діагностиці та контролі адекватності лікування пацієнта. На відміну від комп'ютерної томографії та рентгенівського дослідження, під час використання цього методу організм не піддається впливу іонізуючого випромінювання. Натомість зображення формується під впливом потужного магнітного поля та електромагнітних хвиль із застосуванням комп'ютерної обробки для отримання чіткої деталізації м'яких тканин, кісток та інших внутрішніх структур організму. Для підвищення чіткості зображення часто використовують контрастні речовини. Цей метод не можна використовувати для пошуку уламків заліза. Застосування МРТ протипоказано людям, у яких можуть бути металеві елементи: кардіостимулятори, протези, осколки тощо. Сильне магнітне поле томографа може притягувати залізні предмети, які містяться всередині тіла. Осколки також можуть зміщуватися.

Останнім часом набув поширення *метод магнітопошуку*. Застосовується при висіченні рани неодимовими магнітами з розривним навантаженням 100–150 кг (при глибокому заляганні 200–300). Завдяки взаємодії магнітних полів уламки заліза притягуються до магніту і, відповідно, призводять до утворення горбка на поверхні тіла, завдяки якому можна зробити висновок про місце розташування уламка. Крім того, цей метод використовується і під час витягання осколків: разом з магнітом останній видаляється з тіла пацієнта.

Найпоширенішим натеper є *метод ультразвукової діагностики (УЗД)*. Цей метод постійно вдосконалюється і на сьогодні відомі мінігабаритні пристрої. Але в цьому методі зображення має виводитися на залежний від вайфаю екран, що обмежує його використання в польових умовах. Інші варіанти апаратів УЗД досить габаритні й якість обстеження пацієнта напряму залежить від цього фактора.

Метод прямого спостереження – фрагмент виявляється візуальним спостереженням в реальному часі. Цей метод можливий тільки для

фрагментів з низькою кінетичною енергією, але не гарантує повного знаходження всіх фрагментів.

Отже, основними методами діагностики є: рентгенографія, МРТ, УЗД, КТ, метод пошуку за допомогою магніту, метод прямого спостереження. Основними недоліками цих методів є неможливість їх застосування в умовах бойових дій. Крім того, у випадках певних осколкових поранень деякі види діагностики протипоказані, а деякі взагалі не можуть виявити осколки в тілі людини.

Із цих позицій пошук простих і надійних засобів діагностики сторонніх предметів в організмі пацієнта (без використання рентгенівських апаратів, складних систем МРТ) у польових умовах є актуальною та надзвичайно важливою задачею сьогодення, вирішення якої може врятувати життя і здоров'я тисяч поранених.

Використовуючи 3D-модель імітатора кут і довжину входу шупа, попередньо нам вдалося чітко визначити місце знаходження осколка в тілі, після чого було проведено розріз імітатора ножем і вилучення осколка пінцетом. Оскільки зонд рухається в рановому каналі, то на екрані осцилографа спостерігається значний шумовий ефект, який має бути нівельований спеціальним алгоритмічним забезпеченням, що покращить якість сигналу та його інформативність. Наразі вдалося зафіксувати залежність амплітуди та базової частоти коливань залежно від положення осколка та його розміру в рановому каналі. Залежність форми сигналу від типу осколка потребує подальшого дослідження. Проведено також перевірку розподілу контрольованих параметрів усередині груп, у межах однієї вибірки. Якщо у першому випадку генеральна сукупність даних у цілому не підкоряється закону нормального розподілу, то в другому маємо таке підкорення, що свідчить про існування відмінностей серед серій спостережень, у той час як кожен вимір може характеризуватися середнім значенням контрольованих параметрів із шестисигмовим інтервалом розсіювання, що встановлюється стандартними статистичними процедурами. Оскільки поля розсіювання кожної вибірки порівнянні між собою та порівнянні із загальним полем розсіювання, то функціональна обумовленість відсутня. Тож з 95 % імовірністю можна вважати, що контрольована амплітуда не залежить від того, який осколок міститься в рані, а проявляється випадковим чином.

До комплексу засобів детоксикації поранених залучали препарати ксилат, реосорбілакт, сорбілакт, а у випадках прогресуючої артеріальної ішемії застосувати схему терапії "Тріо": базова терапія + Реосорбілакт 400 мл/добу, Латрен 400 мл/добу, L-аргінін 100 мл/добу.

Висновки

1. Надано теоретичне підґрунтя для розробки принципово нового інструменту для перевірки раневих каналів.

2. Виявлено функціональну обумовленість контрольованих сигналів від форми та типу стороннього предмета в раневому каналі. Доведено доцільність

використання як параметр контрольованого сигналу його частотноамплітудні характеристики.

3. Доведено функціональну обумовленість ширини спектра сигналу шумової емісії в момент механічного контакту зі стороннім предметом у рані, його формою та типом.

4. Визначено, що використання осцилографа з каналом спектрального аналізу дозволяє досить точно ідентифікувати сторонній нерентгеноконтрастний предмет у рані.

5. Доведено, що результативним є параметр ширини смуги шумової емісії, водночас параметр амплітуди сигналу такої властивості не виявив.

Внесок авторів: Віктор Черняк – концептуалізація, формальний аналіз, програмне забезпечення, методологія, валідація даних, написання – оригінальна чернетка; Костянтин Карпенко – написання – перегляд і редагування.

Подяки, джерела фінансування. Висловлюємо подяку за сприяння в написанні цієї роботи Національному фонду досліджень України.

Список використаних джерел

- Baum, G. R., Baum, J. T., Hayward, D., & MacKay, B. J. (2022). Gunshot Wounds: Ballistics, Pathology, and Treatment Recommendations, with a Focus on Retained Bullets. *Orthopedic Research and Reviews*, 14, 293–317. <https://doi.org/10.2147/ORR.S378278>
- Charles, S., Geusens, N., & Nys, B. (2023). Interpol Review of Gunshot Residue 2019 to 2021. *Forensic Science International: Synergy*, 6, 100302. <https://doi.org/10.1016/j.fsisyn.2022.100302>
- Fountain, A. J., Corey, A., Malko, J. A., Strozier, D., & Allen, J. W. (2021). Imaging Appearance of Ballistic Wounds Predicts Bullet Composition: Implications for MRI Safety. *American Journal of Roentgenology*, 216(2), 542–551. <https://doi.org/10.2214/AJR.20.23648>
- Gumeniuk, K., Lurin, I., Tsema, I., Susak, Y., Mykhaylenko, O., Nehoduiko, V., Krymchuk, S., Gryshchenko, O., Lopatiuk, K., Maksymenko, M., Dubenko, D., & Tsema, Y. (2021). Wound ballistics of biological tissue's plastic deformation on the model of ballistic plastiline using hollow point and shape-stable bullets. *Journal of Education, Health and Sport*, 11(11), 37–57. <https://doi.org/10.12775/JEHS.2021.11.11.003>
- Paolucci, J. C., & Diaczuk, P. (2023). The effects of certain intermediary target materials and their proximity to ballistic gelatin on jacketed hollow point bullet expansion. *Journal of Forensic Sciences*, 68(6), 1932–1945. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.15362>
- Tymbaliuk, V., Lurin, I., Gumeniuk, K., Herasymenko, O., Furkalo, S., Oklei, D., Negoduyko, V., Gorobeiko, M., & Dinets, A. (2023). Modeling of wound ballistics in biological tissues simulators. *Medicni Perspektivi*, 28(1), 37–48. <https://doi.org/10.26641/2307-0404.2023.1.275866>
- Wang, J., Chen, J., Zhou, J., Qiu, J., & Yao, Y. (2023). Injuries from Conventional Explosive Weapons. In Zhengguo Wang, Jianxin Jiang (Eds.), *Explosive Blast Injuries* (pp. 505–547). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-2856-7_33

References

- Baum, G. R., Baum, J. T., Hayward, D., & MacKay, B. J. (2022). Gunshot Wounds: Ballistics, Pathology, and Treatment Recommendations, with a Focus on Retained Bullets. *Orthopedic Research and Reviews*, 14, 293–317. <https://doi.org/10.2147/ORR.S378278>
- Charles, S., Geusens, N., & Nys, B. (2023). Interpol Review of Gunshot Residue 2019 to 2021. *Forensic Science International: Synergy*, 6, 100302. <https://doi.org/10.1016/j.fsisyn.2022.100302>

Fountain, A. J., Corey, A., Malko, J. A., Strozier, D., & Allen, J. W. (2021). Imaging Appearance of Ballistic Wounds Predicts Bullet Composition: Implications for MRI Safety. *American Journal of Roentgenology*, 216(2), 542–551. <https://doi.org/10.2214/AJR.20.23648>

Gumeniuk, K., Lurin, I., Tsema, I., Susak, Y., Mykhaylenko, O., Nehoduiko, V., Krymchuk, S., Gryshchenko, O., Lopatiuk, K., Maksymenko, M., Dubenko, D., & Tsema, Y. (2021). Wound ballistics of biological tissue's plastic deformation on the model of ballistic plastiline using hollow point and shape-stable bullets. *Journal of Education, Health and Sport*, 11(11), 37–57. <https://doi.org/10.12775/JEHS.2021.11.11.003>

Paolucci, J. C., & Diaczuk, P. (2023). The effects of certain intermediary target materials and their proximity to ballistic gelatin on jacketed hollow point bullet expansion. *Journal of Forensic Sciences*, 68(6), 1932–1945. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.15362>

Tsybaliuk, V., Lurin, I., Gumeniuk, K., Herasymenko, O., Furkalo, S., Oklei, D., Negoduyko, V., Gorobeiko, M., & Dinets, A. (2023). Modeling of wound ballistics in biological tissues simulators. *Medicni Perspektivi*, 28(1), 37–48. <https://doi.org/10.26641/2307-0404.2023.1.275866>

Wang, J., Chen, J., Zhou, J., Qiu, J., & Yao, Y. (2023). Injuries from Conventional Explosive Weapons. In Zhengguo Wang, Jianxin Jiang (Eds.), *Explosive Blast Injuries* (pp. 505–547). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-2856-7_33

Отримано редакцією збірника / Received: 05.07.24

Прорецензовано / Revised: 13.09.24

Схвалено до друку / Accepted: 01.10.24

Viktor CHERNYAK, DSc (Med.), Prof.

ORCID ID: 0000-0001-8424-4691

e-mail: victorchernyak.ohta@gmail.com

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Kostiantyn KARPENKO, PhD

ORCID ID: 0000-0002-9737-4484

e-mail: zushpre@gmail.com

National Military Medical Clinical Center "Main Military Clinical Hospital", Kyiv, Ukraine

DEVELOPMENT OF A DEVICE FOR THE DETECTION OF NON-X-RAY CONTRAST FRAGMENTS IN THE WOUNDED AFTER BURNT INJURIES

Introduction. Since the injury often occurs not only with radiopaque fragments and bullets, the diagnosis of the position of foreign bodies in the wound channel or the patient's cavity is complicated. In the conditions of modern conflict, new types of weapons and striking projectiles are used, and new materials, in particular modifications of plastic, are increasingly used as bullets, projectile shells, and offensive and defensive grenades. Cases of splinter damage to soft tissues by plastic and glass elements are increasingly common. Plastic, getting into the human body's soft tissues, has the properties of the cores of bursting bullets, significantly increasing the size of the pulsating cavity of the wound channel. At the same time, the ability of plastic and glass to shatter in the body may require opening wounds to treat and remove these foreign objects, increasing the trauma and prolonging the rehabilitation period of patients. Searching for a fragment, especially a non-radiocontrast one, in the wound channel is often difficult and long, which is associated with its insufficient visualization, a change in the normal anatomy in gunshot wounds, and the difficulty of the surgical search. Therefore, the search for simple and reliable means of diagnosing foreign objects in the patient's body (without the use of X-ray machines) in the field is an urgent and

extremely important task today, the solution of which can save the lives and health of thousands of wounded.

Conclusions. *The article describes the prerequisites for the development of a new method of diagnosing the presence of extraneous non-contrast fragments in a patient's wound through direct contact. The use of the noise emission effect is described for the detection of fragments. Due to the difference in noise, it is possible to tactilely diagnose the location of the fragment. After experimenting with the biological model, it was possible to record the dependence of the amplitude and base frequency of oscillations depending on the position of the fragment and its size in the wound channel. The article also provides an example of an effective pain relief scheme when searching for fragments.*

Key words: *prerequisite, development, device, detection, debris, gunshot wounds.*

Автори В. Черняк та К. Карпенк заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors V. Chernyak and K. Karpenko declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

UDC (004.032.26:612.65-053.2)

DOI: <https://doi.org/10.17721/3041-1491/2024.11-42>

Ivan RIABKO^{1,2}, Master's Student

ORCID ID: 0009-0000-6748-8686

e-mail: vanoryabko@gmail.com

Andrii TERETS^{1,2}, Master's Student

ORCID ID: 0000-0003-3668-6131

e-mail: terets.andrii@gmail.com

Stanislav RIEBIENKOV², Head of the Department

ORCID ID: 0000-0001-8116-5277

e-mail: rebenkov@gmail.com

Sergiy RADCHENKO¹, PhD (Phys. & Math.), Assoc. Prof.

ORCID ID: 0000-0001-9153-5470

e-mail: sprad@knu.ua

¹Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine,

²National Children's Specialized Hospital "OHMATDYT", Kyiv, Ukraine

ASSESSING A CHILD'S BONE AGE USING DEEP LEARNING ON HAND X-RAY IMAGES

Introduction. *Assessing children's bone age is essential for detecting growth and developmental disorders. By comparing bone age to chronological age, physicians can identify deviations and diagnose issues.*

Methods. *In this study, we used a neural network model to predict the bone age of children based on X-ray images of their hands.*

Results. *The effectiveness of such application of the model is demonstrated in comparison with the average error results on the validation dataset.*

Conclusions. *Our study has demonstrated that the DenseNet169 architecture, when integrated with patient gender information, can effectively predict bone age from X-ray images, yielding competitive results compared to established models like Milvue. We hope this approach will significantly improve prediction accuracy and provide deeper insights into bone development. By focusing on critical anatomical regions and integrating relevant clinical data, we aim to set new standards in automated bone age assessment, ultimately benefiting pediatric healthcare.*

Keywords: *DenseNet169, Bone Age Assessment, X-ray Image Analysis, Statistical Estimation.*

Introduction

Assessing children's bone age is essential for detecting growth and developmental disorders (Greulich, & Pyle, 1959). By comparing bone age to chronological age, physicians can identify deviations and diagnose issues. Hand X-ray analysis is a key tool in this process, offering a clear view of bone development. Automating this assessment using neural networks improves accuracy and objectivity, reducing human error (Lindner et al., 2020). In this study, we propose and evaluate a neural network model trained on X-ray images, using mean absolute error as the metric.

Recent advances in deep learning for predicting bone age have gained attention due to their potential to automate and enhance accuracy in pediatric diagnostics (Lindner et al., 2020; Jabbar, & Abdulmunem, 2023). Studies have shown the effectiveness of convolutional neural networks (CNNs) in this domain (Tan, & Le, 2020; Huang et al., 2017). The RSNA Bone Age Challenge provided a large dataset, benchmarking models like ResNet and DenseNet for bone age prediction (RSNA Bone Age Competition Dataset: <https://www.kaggle.com/kmader/rsna-bone-age>). DenseNet169, in particular, improves accuracy by incorporating patient data like gender (Huang et al., 2017).

Data augmentation techniques, such as scaling, rotation, and flipping, have been crucial in addressing image variability and preventing overfitting (Shorten, & Khoshgoftaar, 2019). Including clinical features like gender further refines predictions by accounting for biological differences in bone development (Jabbar, & Abdulmunem, 2023). Fine-tuning pre-trained models on medical datasets, such as ImageNet, enhances performance and reduces computational demands (Tan, & Le, 2020).

Overall, the combination of deep learning architectures with large datasets positions automated bone age estimation as a reliable tool in pediatric healthcare. These advancements have the potential to surpass traditional methods in speed and accuracy, making them valuable in clinical applications.

Methods

Model Architecture and Methodology. In this study, a transfer learning model based on DenseNet169 was used for bone age assessment (Huang et al., 2017). The model was adapted to work with X-ray images of hands and patient gender information. In addition to the image, to enhance the accuracy of age prediction, additional input—patient gender information—was included. This information is first converted into numerical format and passed through a separate fully connected layer with 32 neurons and a ReLU activation function.

The extracted features from DenseNet169 and the gender information are then combined and passed through two fully connected layers with 512 and 256 neurons respectively, before reaching the output layer with a single neuron and a linear activation function, which predicts the age in months.

Data set's structure and properties. The RSNA Bone Age dataset (RSNA Bone Age Competition Dataset: <https://www.kaggle.com/kmader/rsna-bone-age>) contained 12,606 X-ray images of hands with images distribution by children age (Fig. 1). The dataset was divided into two independent groups: 90 % for model training and 10 % for testing. The convolutional neural network DenseNet169 was employed for predicting bone age as this model type is designed to perform image classification (Densely Connected Convolutional Networks: <https://arxiv.org/abs/1608.06993>), Skeletal Development of the Hand and Wrist (Greulich, & Pyle, 1959).

To further enhance the model's quality and address a wide range of potential image imperfections, various data augmentation techniques were meticulously applied (Shorten, & Khoshgoftaar, 2019; Jabbar, & Abdulmunem, 2023). These imperfections, which could include issues such as dark or underexposed images, misaligned or inverted images, and varying lighting conditions, have the potential to

negatively impact the accuracy of the model. By applying data augmentation, we aimed to simulate a broader variety of scenarios that the model might encounter in real-world applications, thus improving its robustness and adaptability.

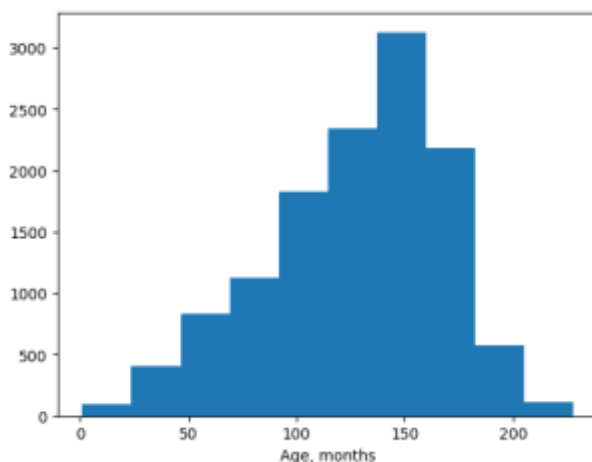


Fig. 1. Age category distribution

The data augmentation process involved a series of carefully selected image transformations, such as scaling, shifting, rotation, zooming, and horizontal flipping. Each of these transformations plays a crucial role in increasing the diversity of the training data, which in turn helps to prevent overfitting – a common issue in deep learning models where the model performs well on the training data but poorly on unseen data. By exposing the model to a wider variety of augmented images, we aimed to enhance its ability to generalize across different imaging conditions and patient populations.

For the purpose of maintaining consistency in the input data, all X-ray images were uniformly scaled to a resolution of 500×500 pixels. This standardization ensures that the model processes each image with the same level of detail, which is critical for extracting consistent features across the entire dataset. Additionally, to further diversify the training data, transformations such as random rotation and horizontal flipping were repeatedly applied, creating a more comprehensive set of input images for the model to learn from (Alhassan, & Mumuni, 2022).

In addition to image augmentation, the age data was normalized to ensure that the model could efficiently learn from it without being biased by the absolute scale of the values. Gender information, another crucial input feature, was carefully converted into a binary format, allowing the model to seamlessly integrate this categorical data alongside the numerical image data during training. This combination of data augmentation and careful preprocessing contributed significantly to the model's ability to learn effectively from the available data, ultimately improving its performance in predicting bone age (Fig. 2).

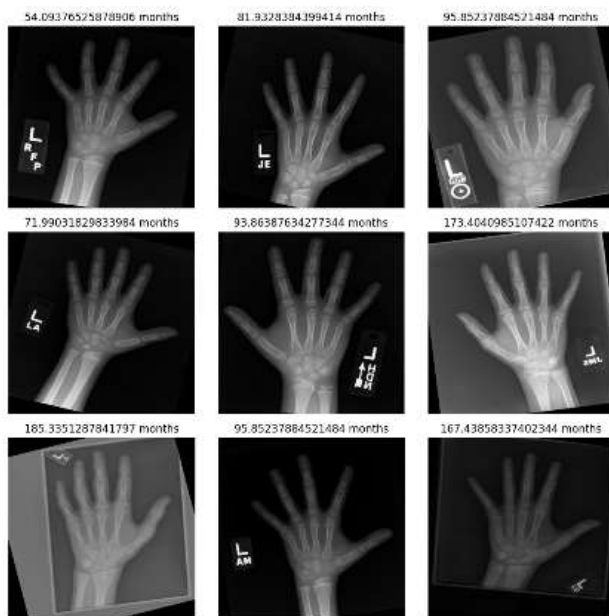


Fig. 2. Example of a training batch

Two CSV tables were prepared for the RSNA Bone Age dataset: one for the training set and one for the test set. These tables contain the following information:

- **ID:** A unique identifier for the X-ray image.
- **BoneAge:** The bone age in months, as determined by radiologists.
- **Gender:** The gender of the child ("1" denotes boys, "0" – girls).

Training and Evaluation. The model was trained using the L1 Loss function, which measures the absolute differences between predicted and actual values. The Adam optimizer, known for its efficiency in providing adaptive learning rates, was employed during the training process. The model was trained for 100 epochs, where an epoch refers to a complete pass through the entire training dataset. The primary evaluation metric was L1 Loss, calculated on both the training and validation sets. After 100 epochs, the model achieved a Mean Absolute Distance (MAD) of 5.2 months on the validation set, indicating reliable predictions for unseen X-ray images. To monitor the optimization of the model's parameters, we tracked the loss function throughout the training process. Fig. 3 illustrates the convergence of the loss function, showing a consistent decrease over time, which indicates effective learning by the model. Additionally, testing on a holdout test set confirmed that the model generalizes well, providing similar MAD values (Fig. 5), where the actual values versus predicted values on the validation dataset are shown.

Results

Throughout our research, we conducted a comprehensive comparative analysis between our neural network model and the well-known French model, Milvue (Milvue, n. d.), using a robust set of clinical data. The analysis focused on X-ray images of the

hands, which represent one of the most reliable and widely used methods for assessing bone age in both clinical and research settings. The hands contain numerous bones at various stages of development, making them an ideal site for examining skeletal growth and maturity, which is particularly relevant in pediatric assessments.

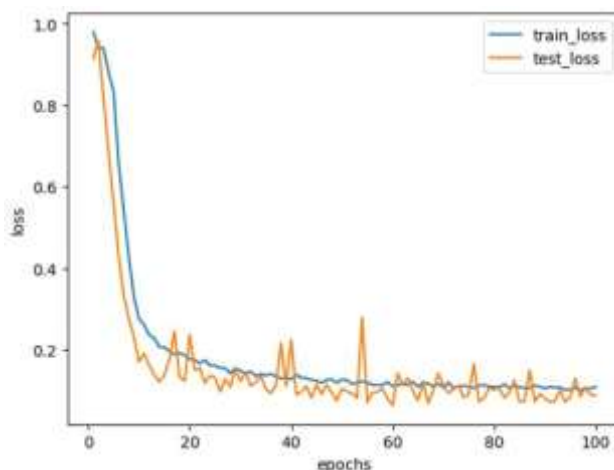


Fig. 3. Loss depending on the eras

Our findings showed that the L1 Loss for the Milvue model was 9.6 months, while our model achieved an L1 Loss of 11.2 months. Although this 1.6-month difference indicates that our model's accuracy is slightly lower, it is crucial to highlight that the difference is relatively minor. Additionally, our model achieved a Mean Absolute Distance (MAD) of 5.2 months on the validation set, indicating reliable predictions for unseen X-ray images. The performance of our model falls well within the expected range, particularly when considering results from the RSNA Bone Age test set. This demonstrates that despite the slight discrepancy in accuracy, our model is still highly capable of delivering reliable and clinically useful predictions.

The graph below provides a visual representation of the comparison between the two models. The X-axis represents the actual chronological age of the patients, while the Y-axis indicates the predicted age as calculated by the models. In the graph, predictions made by our model are illustrated in blue, while those made by the Milvue model are shown in red (Fig. 4-5).

This visual comparison shows that both models perform consistently across various age groups, reinforcing the clinical utility of our model. The higher L1 Loss in our model highlights areas for improvement, particularly in image preprocessing and focusing on growth zones, which are essential for understanding skeletal maturity. Our analysis reveals opportunities for enhancement. We plan to integrate a more advanced architecture focused on regions of interest to prioritize the most informative parts of the images for improved precision in bone age predictions. Additionally, we will implement a dual-model approach: one model will segment growth zones, while the other will predict age based on information from these

regions. We will test this new architecture on the same dataset as our initial model to ensure comparable results and validate its effectiveness with real clinical data. In conclusion, our model shows competitive performance and potential for development. By refining the architecture and targeting key anatomical regions, we aim to achieve greater accuracy in bone age assessment.

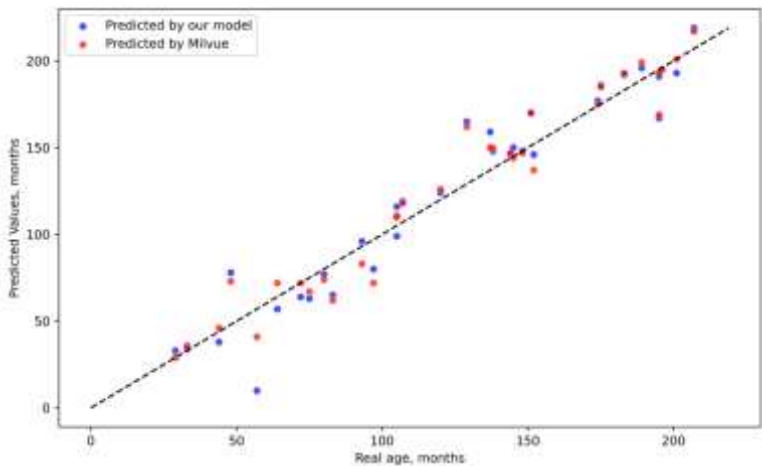


Fig. 4. Comparison our model with Milvie model.
Blue dots denotes our model prediction, and the red milvie prediction

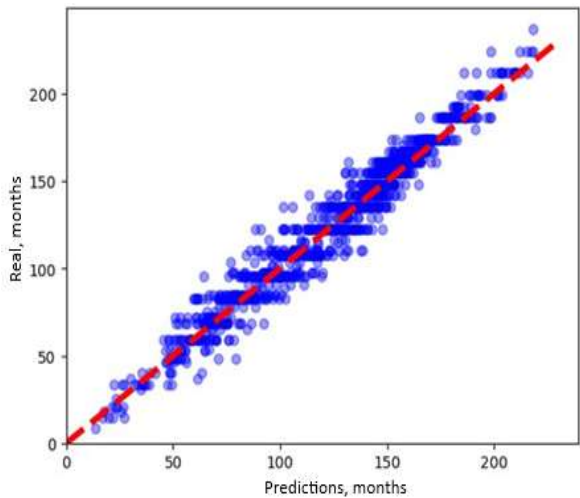


Fig. 5. Actual values versus predicted on validation dataset

Discussion and conclusions

Our study has demonstrated that the DenseNet169 architecture, when integrated with patient gender information, can effectively predict bone age from X-ray images, yielding competitive results compared to established models like Milvie (Milvie, n.d.).

While our model had a slightly higher L1 Loss compared to Milvue, the difference was minimal, underscoring the robustness of our model for clinical use. On the validation set of the RSNA dataset, we achieved a MAD of 5.2 months. To further improve prediction accuracy, we plan to implement a more advanced architecture that focuses on regions of interest, particularly growth zones. This approach will involve using a combination of models: one for segmenting growth zones and another for predicting age based on these segments. We believe this will enhance the precision of our analysis and improve the accuracy of bone age prediction. The new architecture will be tested on the same dataset as our original model to ensure comparability and will also be validated on real clinical data for practical application. We hope this approach will significantly improve prediction accuracy and provide deeper insights into bone development. In conclusion, our research highlights the importance of continually refining deep learning models in medical imaging. By focusing on critical anatomical regions and integrating relevant clinical data, we aim to set new standards in automated bone age assessment, ultimately benefiting pediatric healthcare.

Authors' contribution: Ivan Riabko – software, writing, original draft, methodology; Andrii Terets – software, methodology, validation; Stanislav Riebienkov – conceptualization, methodology, formal analysis; Sergiy Radchenko – writing, review & editing.

References

- Alhassan, M., & Mumuni, F. (2022). Data augmentation: A comprehensive survey of modern approaches. *Array*, 16, 100258. <https://doi.org/10.1016/j.array.2022.100258>
- Greulich, W.W., & Pyle, S.I. (1959). *Radiographic Atlas of Skeletal Development of the Hand and Wrist* (2nd ed.). Stanford University Press. <https://www.cambridge.org/core/journals/amg-acta-geneticae-medicae-et-gemellologiae-twin-research/article/w-w-greulich-and-s-i-pyle-radiographic-atlas-of-skeletal-development-of-the-hand-and-wrist-2nd-edition-i-volumeatlante-di-256-pagine-stanford-university-press-stanford-california-1959/40E97D3A609810F793A4228BE960A7CA>
- Huang, G., Liu, Z., Van Der Maaten, L., & Weinberger, K. Q. (2017). Densely connected convolutional networks. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 4700–4708). <https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.243>, https://www.researchgate.net/publication/306885833_Densely_Connected_Convolutional_Networks
- Jabbar, A.J., & Abdulmunem, A. (2023). Bone age assessment based on deep learning architecture. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 13(2), 2078–2085. <https://doi.org/10.11591/ijece.v13i2.pp2078-2085>
- Lindner, C., Thiagarajah, S., Wang, C., Wilkinson, J. M., & Bowes, M. (2020). Bone age estimation using a deep learning model with anatomical domain knowledge. In *Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA), 2020 International Conference* (pp. 610–617). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59725-2_61
- Milvue. (n. d.). *AI-powered medical imaging solutions*. <https://www.milvue.com/>
- Shorten, C., & Khoshgoftaar, T.M. (2019). A survey on image data augmentation for deep learning. *Journal of Big Data*, 6(1), 1–48. <https://doi.org/10.1186/s40537-019-0197-0>
- Tan, M., & Le, Q.V. (2020). EfficientNet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks. In *International Conference on Machine Learning* (pp. 6105–6114). PMLR. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.11946>, <https://proceedings.mlr.press/v97/tan19a.html>

Отримано редакцією збірника / Received: 31.08.24

Прорецензовано / Revised: 16.09.24

Схвалено до друку / Accepted: 23.10.24

Іван РЯБКО^{1,2}, магістр
ORCID ID: 0009-0000-6748-8686
e-mail: vanoryabko@gmail.com

Андрій ТЕРЕЦЬ^{1,2}, магістр
ORCID ID: 0000-0003-3668-6131
e-mail: terets.andrii@gmail.com

Станіслав РЕБЕНКОВ²
ORCID ID: 0000-0001-8116-5277
e-mail: rebenkov@gmail.com

Сергій РАДЧЕНКО¹, канд. фіз.-мат. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0001-9153-5470
e-mail: sprad@knu.ua

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

²Національна дитяча спеціалізована лікарня "ОХМАТДИТ", Київ, Україна

ПРОГНОЗУВАННЯ КІСТКОВОГО ВІКУ ДІТЕЙ ЗА ДОПОМОГОЮ ГЛИБОКОГО НАВЧАННЯ НА ОСНОВІ РЕНТГЕНІВСЬКИХ ЗНІМКІВ КИСТЕЙ РУК

Вступ. У цьому дослідженні розроблено модель на основі нейронної мережі для прогнозування віку кісток у дітей, використовуючи рентгенівські знімки їхніх рук. Мета роботи полягала в розробці та оцінюванні ефективності такої моделі для підвищення точності діагностики в педіатрії.

Методи. Для досягнення цієї мети було використано підхід перенесення навчання на основі архітектури DenseNet169, який дозволяє обробляти зображення рук та додаткову інформацію про статть пацієнта. Методика включала масштабування зображень до розміру 500x500 пікселів, нормалізацію даних віку та перетворення інформації про статть у бінарний формат. Для підвищення якості моделі було застосовано методи розширення даних, такі як масштабування, поворот, зміщення та горизонтальне віддзеркалення зображень. Крім того, модель була доопрацьована шляхом включення додаткових повністю зв'язаних шарів для покращення прогнозування віку.

Результати. Отримані результати показали, що середня абсолютна похибка (MAE) моделі становила 6,506 місяців, що свідчить про високу здатність до узагальнення та адекватне пристосування до нових даних.

Висновки. Практична цінність цієї роботи полягає в тому, що модель може бути ефективно використана у педіатричній діагностиці для автоматизованого визначення віку кісток, що значно спрощує та прискорює цей процес.

Ключові слова: DenseNet169, прогнозування віку кісток, рентгенівські знімки, статистичне оцінювання.

Автори І. Рябко, А. Тереть та С. Ребенков заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Відповідальний редактор С. Радченко заявляє про відсутність конфлікту інтересів та невтручання в процес оцінювання цієї статті відповідно до міжнародних стандартів публікаційної етики. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors I. Riabko, A. Terets and Stanislav Riebienkov declare no conflicts of interest. The Executive Editor S. Radchenko declares that there is no conflict of interest and has not interfered in the evaluation process of this article, in accordance with international publication ethics standards. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

УДК 51.76; 620.179

DOI: <https://doi.org/10.17721/3041-1491/2024.11-43>

Костянтин ЛАПІТАН, асп.

ORCID ID: 0000-0003-0050-405X

e-mail: lapitan.kostiantyn@student.karazin.ua

Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, Харків, Україна

Костянтин НЕМЧЕНКО, д-р фіз.-мат. наук, проф.

ORCID ID: 0000-0002-0734-942X

e-mail: nemchenko@karazin.ua

Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, Харків, Україна

Дар'я ЛІСТРОВА, магістр

ORCID ID: 0000-0002-3202-8150

e-mail: d.listrova@karazin.ua

Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, Харків, Україна

МОДИФІКОВАНІ АЛГОРИТМИ ЛІНІЙНОГО СКАНУВАННЯ В КОМП'ЮТЕРНІЙ ТОМОГРАФІЇ

Вступ. У цій роботі досліджується та аналізується ефективність нового підходу до комп'ютерної томографії, що базується на методиці конусної томографії з використанням прямолінійної траєкторії руху джерела випромінювання. Стандартні наближені методи реконструкції, попри їхню швидкість, можуть призводити до зниження якості зображень, що критично для діагностики, наприклад, при виявленні новоутворень малого розміру на ранніх стадіях.

Методи. Запропонований підхід, заснований на точних методах реконструкції, тому проєкційні дані, отримані від такої геометрії сканування, повні, що дозволяє очікувати точну та високоякісну реконструкцію об'єкта. Однак практичне застосування такої геометрії сканування має певні недоліки й обмеження, тому пропонуються кілька варіантів можливих модифікацій алгоритму.

Результати. У статті наведено результати дослідження ефективності методів реконструкції зображень на основі моделювання різних сценаріїв сканування. Результати свідчать про високу точність реконструкції у використанні квадратно-замкненої траєкторії за обмеженої довжини ходу випромінювача.

Висновки. Розроблено аналітичний алгоритм реконструкції та проведено його порівняння з класичним алгоритмом Фельдкамп-Девіса-Крейса. Результати показали, що новий алгоритм забезпечує точнішу реконструкцію та швидшу обробку даних, що сприятиме поліпшенню діагностичних процедур у медичній практиці.

Ключові слова: комп'ютерна томографія, конусний промінь, медична діагностика, тривимірна реконструкція.

Вступ

Більшість алгоритмів комп'ютерної томографії які використовують у медичних дослідженнях належать до наближених методів реконструкції (Булавін та ін., 2017; Fu, Tseng, & Vedantham, 2024). Насамперед це пов'язано з алгоритмічною простотою таких методів і швидкодією, що дозволяє отримувати візуалізацію внутрішніх органів у реальному часі (Тао et al., 2020). Недоліком такого підходу є погіршення якості зображень та більша кількість шумів (Withers et al., 2021), що може бути критичним для виявлення раку на ранніх стадіях.

© Лапітан Костянтин, Немченко Костянтин, Лістрова Дар'я, 2024

Іншим підходом до розв'язання задачі тривимірної реконструкції є використання точних методів реконструкції. Такі методи відрізняються тим, що траєкторія руху випромінювача збігається із площинами, у яких відбувається реконструкція (Haltmeier, 2014; Smith, 1990). Такий підхід до сканування надає змогу отримати повний набір даних про внутрішні структури об'єкта та отримати якісне детальне зображення. Звичною проблематикою таких методів є обмеженість застосування через складну геометрію сканування, як наприклад сфера, променеве навантаження на пацієнта або незадовільний час реконструкції. Виходом з цієї ситуації є використання методики сканування, що задовольняє математичні умови точної реконструкції, але траєкторія випромінювача залишається досить простою для технічної реалізації такого апарата (Weiwen, Chao, & Fenglin, 2016).

Мета цієї роботи полягає в дослідженні методики конусної томографії з використанням прямолінійної траєкторії руху джерела випромінювання.

Завданням роботи: розробка аналітичного алгоритму реконструкції з використанням лінійної геометрії сканування, написання комп'ютерної моделі для перевірки ефективності роботи розробленого алгоритму, а також порівняння результатів нової методики з існуючим підходом, таким як алгоритм Фельдкампа–Девіса–Крейса (FDK).

Методи

Для отримання аналітичної формули реконструкції було застосовано методи інтегральних перетворень. Комп'ютерна програма для перевірки аналітичного алгоритму була написана мовою C#. Розрахунок реконструкції відбувався на ноутбучі Acer NITRO 5 із центральним процесором 11th Gen Intel(R) Core i 5–11400H з тактовою частотою 2.70 ГГц.

Результати

Розглянемо тривимірну проєкцію об'єкта на плаский датчик. Припустимо, що точковий випромінювач рухається вздовж нескінченної прямої і його позиція визначається координатою X_0 . Матриця детекторів, що характеризується координатами X та Y , розташована на відстані H від траєкторії руху випромінювача (рис. 1). При такій геометрії сканування промені конусного випромінювання утворюють похилі площини, що перетинаються вздовж спільної прямої, яка є траєкторією руху випромінювача. Така особливість лінійної геометрії дозволяє перетворити тривимірну задачу реконструкції внутрішніх структур об'єкта, на скінчену кількість двовимірних задач реконструкцій у похилих площинах, в кожній з яких виконується умова повноти даних.

Для розглянутого випадку нескінченної прямої, уздовж якої проводиться сканування, результуюче зображення не зазнає наближень та артефактів, але реальні апарати мають обмеження в лінійних розмірах та в потужності випромінювання. Саме тому треба провести модифікацію аналітичного алгоритму з урахуванням цих обмежень.

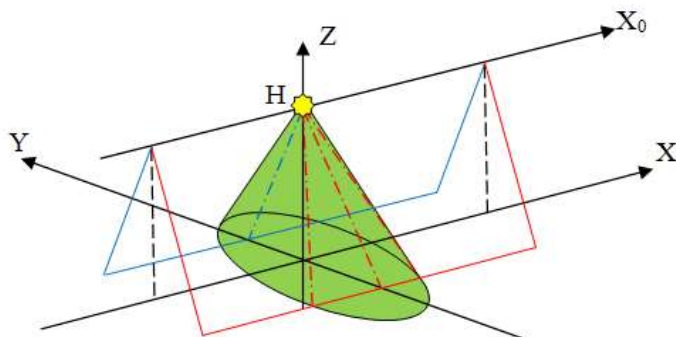


Рис. 1. Сканування конусним променем уздовж прямої лінії

Такою модифікацією стало використання кількох серій дослідів з поворотом системи випромінювача та детектора навколо об'єкта. Найкращих результатів вдалося досягти під час сканування по замкненій квадратній траєкторії з обмеженням довжини прямої X_0 у 768 мм за розмірів об'єкта 256x256 мм. Для порівняння ефективності розробленого алгоритму було запущено реконструкцію об'єкта, що складається із 6 шарів та розмірами 256x256 мм. Реконструкція проводилась двома алгоритмами: Фельдкампа (FDK) та розробленим алгоритмом лінійного сканування (LSG), після чого було обчислено середньоквадратичне відхилення відносно оригіналу. Оригінали поперечного перетину представлено на рис. 2, результат роботи алгоритмів представлено на рис. 3 і 4. Дані порівняння наведено в табл. 1.

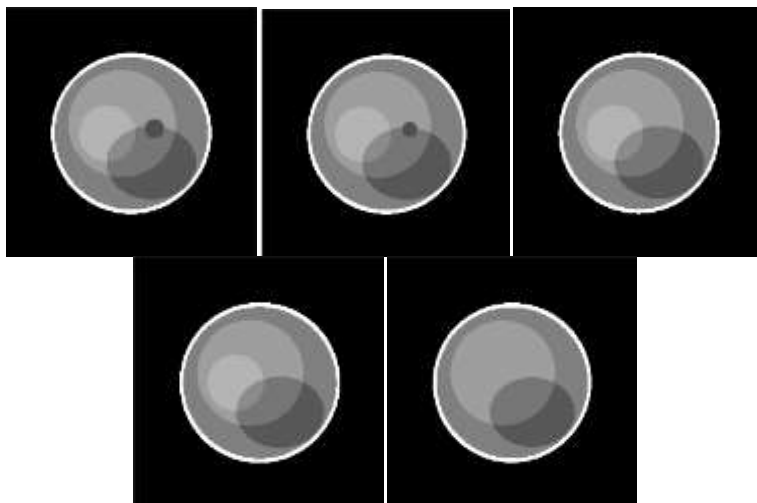


Рис. 2. Оригінал поперечного перетину об'єкта

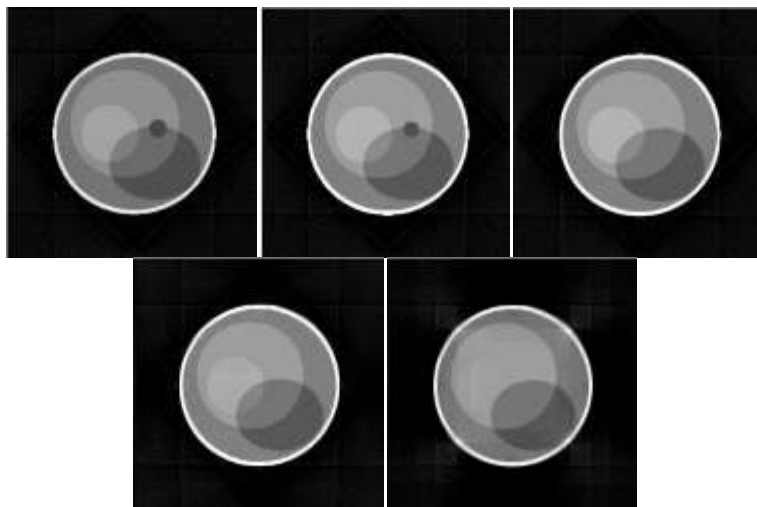


Рис. 3. Реконструкція поперечного перетину алгоритмом LSG

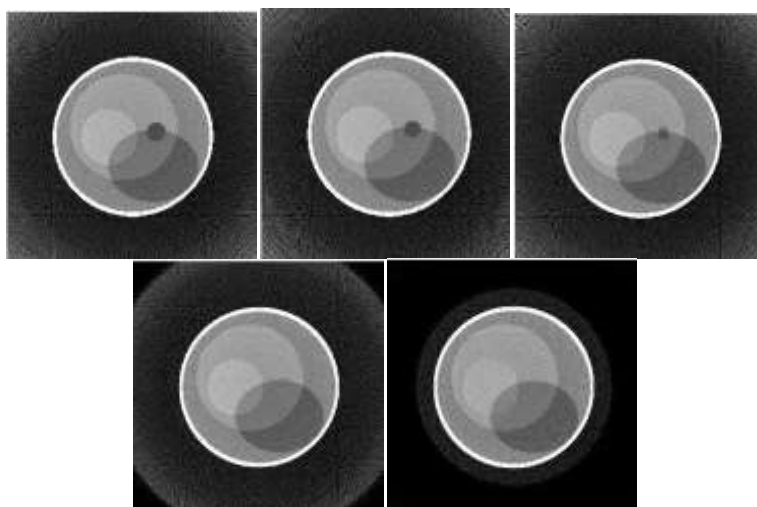


Рис. 4. Реконструкція поперечного перетину алгоритмом FDK

Таблиця 1

Розрахунок середньоквадратичного відхилення реконструкції

Номер шару	LSG	FDK
0	5,4	9,47
3	5,28	9,53
6	5,42	9,67
9	5,83	9,56
12	8,48	10,08

Дискусія і висновки

Порівняно з класичним алгоритмом тривимірної реконструкції використання прямої лінії як геометрії сканування дає більшу проєкційну повноту даних, що забезпечує більш точну та детальну реконструкцію об'єкта. Метод все ще зазнає артефактів через наближення, але вони значно менші і дозволяють отримати якісне представлення про розподіл особливостей структури тіла за більших кутів конусності променя, ніж при звичних методах дослідження. Порівняно з класичним алгоритмом FDK наведений алгоритм обробляє дані швидше в 2.25 раза, що надзвичайно важливо у випадку великого обсягу даних або великої кількості реконструкцій у реальному часі.

Внесок авторів: Костянтин Лапітан – програмне забезпечення, формальний аналіз, написання – оригінальна чернетка; Костянтин, Немченко – концептуалізація, валідація даних; Дар'я Лістрова – програмне забезпечення, написання – перегляд і редагування.

Список використаних джерел

Булавін, Л. А., Забашта, Ю. Ф., Мотолига, О. В., & Сенчуров, С. П. (2017). Аналіз стійкості методів томографічної реконструкції рентгенівських медичних зображень. *Біофізичний вісник*, 37(1), 9–15. <https://doi.org/10.26565/2075-3810-2017-37-02>

Fu, Z., Tseng, H.W., & Vedantham, S. (2024). An attenuation field network for dedicated cone beam breast CT with short scan and offset detector geometry. *Scientific Reports*, 14, 319. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-51077-1>

Haltmeier, M. (2014). Exact reconstruction formulas for a Radon transform over cones. *Inverse Problems*, 30(3), 035001. <https://doi.org/10.1088/0266-5611/30/3/035001>

Smith, B.D. (1990). Cone-beam tomography: recent advances and a tutorial review. *Optical Engineering*, 29(5), 524–534. <https://doi.org/10.1117/12.55621>

Tao, B., Shen, Y., Sun, Y., Huang, W., Wang, F., & Wu, Y. (2020). Comparative accuracy of cone-beam CT and conventional multislice computed tomography for real-time navigation in zygomatic implant surgery. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*, 22(6), 747–755. <https://doi.org/10.1111/cid.12958>

Weiwen, W., Chao, Q., & Fenglin, L. (2016). Filtered Back-Projection Image Reconstruction Algorithm for opposite parallel linear CT scanning. *Acta Optica Sinica*, 36(9), 0911009. <https://doi.org/10.3788/aos201636.0911009>

Withers, P.J., Bouman, C., Carmignato, S., Cnudde, V., Grimaldi, D., Hagen, C.K., Maire, É., Manley, M., Du Plessis, A., & Stock, S.R. (2021). X-ray computed tomography. *Nature Reviews Methods Primers*, 1, 18. <https://doi.org/10.1038/s43586-021-00015-4>

References

Bulavin, L., Zabashta, Y., Motolyha, O., & Senchurov, S. (2017). Analysis of stability of tomographic reconstruction of X-ray medical images. *Biofizychnyi Visnyk Biophysical Bulletin*, 37(1), 9–15 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.26565/2075-3810-2017-37-02>

Fu, Z., Tseng, H.W., & Vedantham, S. (2024). An attenuation field network for dedicated cone beam breast CT with short scan and offset detector geometry. *Scientific Reports*, 14, 319. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-51077-1>

Haltmeier, M. (2014). Exact reconstruction formulas for a Radon transform over cones. *Inverse Problems*, 30(3), 035001. <https://doi.org/10.1088/0266-5611/30/3/035001>

Smith, B.D. (1990). Cone-beam tomography: recent advances and a tutorial review. *Optical Engineering*, 29(5), 524–534. <https://doi.org/10.1117/12.55621>

Tao, B., Shen, Y., Sun, Y., Huang, W., Wang, F., & Wu, Y. (2020). Comparative accuracy of cone-beam CT and conventional multislice computed tomography for real-time navigation in zygomatic implant surgery. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*, 22(6), 747–755. <https://doi.org/10.1111/cid.12958>

Weiwen, W., Chao, Q., & Fenglin, L. (2016). Filtered Back-Projection Image Reconstruction Algorithm for opposite parallel linear CT scanning. *Acta Optica Sinica*, 36(9), 0911009. <https://doi.org/10.3788/aos201636.0911009>

Withers, P.J., Bouman, C., Carmignato, S., Cnudde, V., Grimaldi, D., Hagen, C.K., Maire, É., Manley, M., Du Plessis, A., & Stock, S.R. (2021). X-ray computed tomography. *Nature Reviews Methods Primers*, 1, 18. <https://doi.org/10.1038/s43586-021-00015-4>

Отримано редакцією збірника / Received: 04.09.24

Прорецензовано / Revised: 23.09.24

Схвалено до друку / Accepted: 01.10.24

Kostyantyan LAPITAN, PhD Student

ORCID ID: 0000-0003-0050-405X

e-mail: lapitan.kostiantyn@student.karazin.ua

V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

Kostyantyan NEMCHENKO, DSc (Phys. & Math.), Prof.

ORCID ID: 0000-0002-0734-942X

e-mail: nemchenko@karazin.ua

V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

Daria LISTROVA, Master of Arts

ORCID ID: 0000-0002-3202-8150

e-mail: d.listrova@karazin.ua

V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

MODIFIED LINEAR SCANNING ALGORITHMS IN COMPUTED TOMOGRAPHY

Introduction. *This paper investigates and analyzes the effectiveness of a new approach to computed tomography, based on cone-beam tomography using a linear trajectory of the radiation source. Standard approximate reconstruction methods, despite their speed, can lead to a decrease in image quality, which is critical for diagnostics, such as detecting small-sized tumors at early stages.*

Methods. *The proposed approach is based on exact reconstruction methods, where the projection data obtained from such scanning geometry is complete, allowing for an accurate and high-quality reconstruction of the object. However, the practical application of such scanning geometry has certain drawbacks and limitations, so several possible modifications of the algorithm are proposed.*

Results. *Additionally, the paper presents the results of a study on the effectiveness of image reconstruction methods based on simulations of different scanning scenarios. The results indicate high reconstruction accuracy when using a square-closed trajectory with a limited path length of the radiation source.*

Conclusions. *An analytical reconstruction algorithm was developed and compared with the classical Feldkamp-Davis-Kress (FDK) algorithm. The results showed that the new algorithm provides more accurate reconstruction and faster data processing, which will contribute to improving diagnostic procedures in medical practice.*

Keywords: *computed tomography, cone-beam, medical diagnostics, three-dimensional reconstruction.*

Автори К. Лапітан, К. Немченко, Д. Лістрова заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors K. Lapitan, K. Nemchenko, D. Listrova declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

Sundus OSMAN¹, Master's Student
e-mail: Sundus.osman@ktu.edu

Reda VENSKAUSKAITĖ¹, Master's Student
e-mail: reda.venskauskaite@ktu.edu

Reda ČERAPAITĖ-TRUŠINSKIENE², PhD (Physics)
ORCID ID 0000-0001-6451-3356
e-mail: reda.cerapaitė-trusinskiene@lsmu.lt

Jurgita LAURIKAITIENE^{1,3}, Assoc. Prof.
ORCID ID 0000-0002-4485-381X
e-mail: jurgita.laurikaitiene@ktu.lt

¹Kaunas University of Technology, Kaunas, Lithuania,

²Lithuanian University of Health Science, Kaunas, Lithuania,

³Hospital of Lithuanian University of Health Sciences Kaunas Clinics, Kaunas, Lithuania

SECONDARY CANCER RISK ASSESSMENT OF PELVIC CONE BEAM COMPUTED TOMOGRAPHY IMAGING PROTOCOLS

Introduction. *This study evaluates the secondary cancer risks associated with low-dose ionizing radiation from pelvic cone beam computed tomography (CBCT) imaging protocols in the context of image-guided radiotherapy (IGRT).*

Methods. *The research identifies that effective dose varies significantly with protocol choice and field size; larger fields result in higher doses, emphasizing the need for optimization to balance diagnostic accuracy with safety.*

Results. *Protocols such as Pelvis Fast, characterized by reduced default mAs and shorter scan times, demonstrate substantially lower effective doses compared to alternatives like Pelvis Large, translating to a decreased excess absolute risk (EAR) for secondary cancer development. Utilizing the BEIR VII model for risk assessment, the study underscores the importance of selecting imaging protocols with lower EAR values to mitigate secondary cancer risks effectively.*

Conclusions. *These findings highlight the critical role of protocol selection in reducing radiation exposure while maintaining high image quality, providing valuable guidance for enhancing patient safety in medical imaging practices.*

Keywords: *low doses, risk assessment, linear accelerator, anthropomorphic phantom.*

Introduction

In image-guided radiotherapy (IGRT), cone-beam computed tomography (CBCT) plays a pivotal role in ensuring accurate patient positioning and treatment verification. As a key component of radiation therapy, CBCT has significantly improved the precision of delivering prescribed doses to targeted treatment sites. Although the radiation dose associated with CBCT is lower than therapeutic doses, the cumulative effect and potential long-term consequences warrant careful consideration (Iliopoulos et al., 2023). The additional radiation exposure from CBCT raises concerns about potential risks, such as the development of secondary cancers. Therefore, optimizing

© Osman Sundus, Venskauskaitė Reda,
Čerapaitė-Trušinskiene Reda, Laurikaitiene Jurgita, 2024

CBCT protocols to deliver the lowest possible imaging dose while maintaining image quality is essential for accurate verification (Khan et al., 2022). Balancing dosage is critical; lower dosages might risk cancer recurrence, while higher dosages increase potential damage to healthy tissues (Simonetto et al., 2021). Currently, assessing cancer risks from low-level carcinogen exposure relies on uncertain extrapolations from bioassay data, subjective human judgment, and the controversial linear no-threshold (LNT) dose-response model for estimating cancer risks at low doses (Lau et al., 2021). This study aims to calculate and evaluate the potential secondary cancer risk associated with various pelvic CBCT imaging protocols.

Methods

In this study, image-guided radiotherapy was conducted using a Halcyon 3.0 linear accelerator, which integrates advanced imaging technology to enhance treatment planning and delivery for oncology patients. Cone beam computed tomography (CBCT) with full 360° rotational scanning was employed at a fixed field of view of 49.2 cm, ensuring high-resolution images with a matrix size of 512×512 pixels and a slice thickness of 2.0 mm.

An anthropomorphic phantom (801-P-A; CIRS, Norfolk, VA), the Virtual Human Male Pelvis Phantom Sectional without holes, was used. The experimental setup involved the alignment of the anthropomorphic phantom with the built-in lasers and positioning of the phantom at the isocentre following standard alignment procedures at the Halcyon facility (Fig. 1).



Fig. 1. An anthropomorphic phantom in the left alignment of the laser beam

Various field of view sizes FOV ($3.3 \times 3.3 \text{ cm}^2$, $5 \times 5 \text{ cm}^2$, $10 \times 10 \text{ cm}^2$, and $14 \times 14 \text{ cm}^2$) were systematically assessed to investigate their influence on dose distribution across multiple CBCT imaging protocols (Fig. 2 and Table 1). All measurements were conducted in QA mode



Fig. 2. Visual representation of the pelvis in varying positions during the CBCT examination on the right, with the field size selection process during the CBCT on the left

Table 1
Predetermined configurations for the Halcyon 3.0 kV CBCT protocols

Protocol	Energy, keV	Default, mAs	Scan time, s	CTDIvol, mGy	Field size, cm x cm	DLP, mGy*cm
Pelvis	125	1074	36.7	21.48	14×14	599.9
					10×10	429.5
					5×5	215.2
					3.3×3.3	140.5
Pelvis fast	125	592	21.2	11.84	14×14	330.7
					10×10	236.9
					5×5	119.5
					3.3×3.3	77.5
Pelvis large	140	1456	40.6	38.44	14×14	1037.6
					10×10	766.4
					5×5	383.8
					3.3×3.3	252.3
Pelvis large fast	140	698	24	18.43	14×14	514.6
					10×10	368
					5×5	185.3
					3.3×3.3	123.4

The effective doses calculated from dose length product (DLP) using equation (1) from AAPM report 96 (Altergot et al., 2023), are shown below:

$$E_{eff} = k \cdot DLP, \quad (1)$$

where k for pelvis = 0.015 (Buxi et al., 2014). The excess absolute risk (EAR) was calculated using the Biological Effects of Ionizing Radiation (BEIR VII) model:

$$EAR = \beta_s D \exp(\gamma e^*) \left(\frac{a}{60}\right)^\eta, \quad (2)$$

where D is the dose (Sv), e is the age at exposure (years), e^* is the attained age (years), β_s stands for the excess relative risk per sievert (ERR/Sv), γ and η being associated parameters for ERR/Sv. The age of exposure was standardized at 30 years

($e = 30$), and the age attained was set at 60 years ($a = 60$) as a conservative assumption. By setting e^* to 0 when e equals 30 (Altergot et al., 2023). The adjustment function in equation (2) is eliminated, leading to a simplified equation for calculating the EAR:

$$EAR = \beta_s D . \tag{3}$$

In the BEIR VII report (National Research Council (U.S.). Committee to Assess Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation, 2006), the relevant model parameters for prostate secondary cancer are provided in Table 2. These parameter values are used to calculate the excess absolute risk for prostate secondary cancer.

Table 2
Parameters in (BEIR VII model – Phase 2, table 12-2) for prostate secondary cancer

Model parameter	Male
β_s	0.11
Γ	-0.41
η	2.8

Results

An analysis of kV-CBCT pelvis region protocols revealed significant variations in effective dose and EAR values across different protocols and field sizes. Table 3 summarizes the calculated effective doses and EARs for each protocol and field size combination (Fig. 3). Protocols with higher default mAs and longer scan times resulted in higher effective doses and EARs. The Pelvis Fast protocol demonstrated lower effective doses and EARs compared to the Pelvis protocol. Increasing the field size consistently led to higher effective doses and EARs.

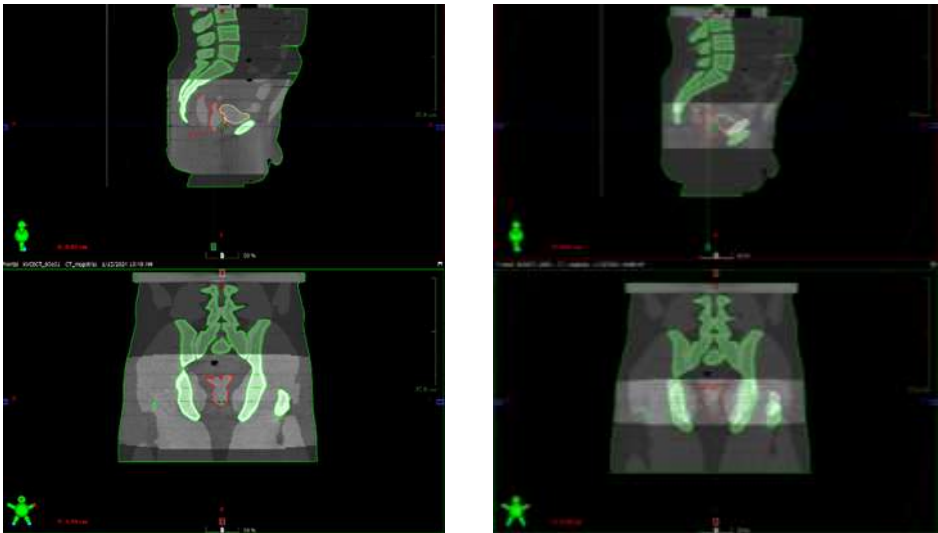


Fig. 3. Visualizing the impact of field size on pelvic CBCT Imaging
A Comparison of 5 cm x 5 cm(right) and 10 cm x 10 cm(left) Field Sizes

Table 3

Presents the predetermined configurations for the Halcyon 3.0 kV CBCT protocols

Protocol	Energy (keV)	Default (mAs)	Scan time (s)	CTDIvol (mGy)	Field size (cmxcm)	DLP (mGy*cm)	Effective dose (mSv)	EAR
Pelvis	125	1074	36.7	21.48	14×14	599.9	9.00	0.99
					10×10	429.5	6.44	0.71
					5×5	215.2	3.22	0.35
					3.3×3.3	140.5	2.10	0.23
Pelvis fast	125	592	21.2	11.84	14×14	330.7	4.97	0.55
					10×10	236.9	3.56	0.39
					5×5	119.5	1.80	0.20
					3.3×3.3	77.5	1.16	0.13
Pelvis large	140	1456	40.6	38.44	14×14	1037.6	16.11	1.77
					10×10	766.4	11.94	1.31
					5×5	383.8	5.76	0.63
					3.3×3.3	252.3	3.78	0.41
Pelvis large fast	140	698	25	18.43	14×14	514.6	7.73	0.85
					10×10	368	5.52	0.61
					5×5	185.3	2.78	0.31
					3.3×3.3	123.4	1.85	0.20

It was observed that increased field sizes are associated with higher effective dose values (Fig. 4), whereas reduced field sizes correspond to decreased doses. This emphasizes the significance of adjusting the dimensions of the field to achieve a balance between diagnostic requirements and ensuring radiation safety. Healthcare providers can reduce patient radiation exposure by using lower (Iliopoulos et al., 2023) field sizes wherever feasible, without affecting the quality of imaging. Optimal modifications to the size of the field in CBCT imaging for pelvic examinations are essential maintaining the delicate balance between accuracy in diagnosis and patient safety.

A clear positive correlation exists between effective dose and EAR (Fig. 5). As the effective dose increases, the EAR for cancer development also shows a corresponding increase. This underscores the importance of minimizing radiation exposure during medical imaging procedures to reduce the associated cancer risks.

The significant variations in excess absolute risk (EAR) values across different pelvic CBCT protocols and field sizes. Notably, the Pelvis Fast protocol demonstrated a substantially lower EAR of 0.55 compared to the Pelvis protocol's 0.99, reflecting a 44 % reduction in cancer risk associated with the lower effective dose (4.97 mSv vs. 9.00 mSv). This finding highlights the importance of selecting appropriate protocols to minimize the risk of radiation-induced secondary cancers in patients undergoing pelvic imaging. While higher effective doses can offer benefits in terms of enhanced image quality and diagnostic accuracy, they also lead to increased cancer risks. Therefore, healthcare providers must carefully balance these competing factors. For patients where high-quality imaging is crucial, alternative imaging modalities with lower radiation doses should be explored whenever possible.

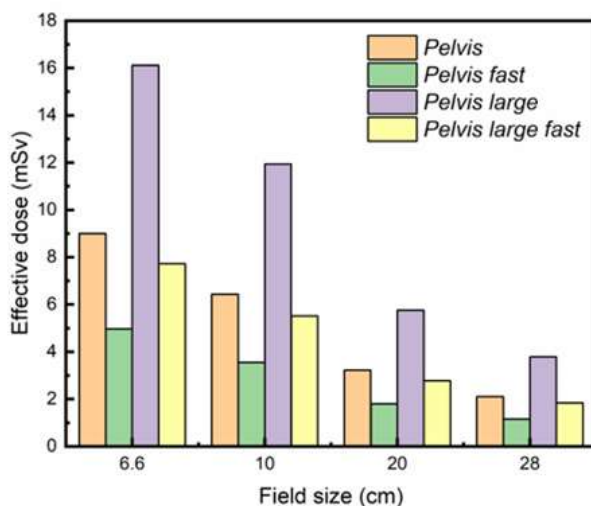


Fig. 4. Correlation between field size and effective dose in halcyon 3.0 kV CBCT protocols for pelvis imaging

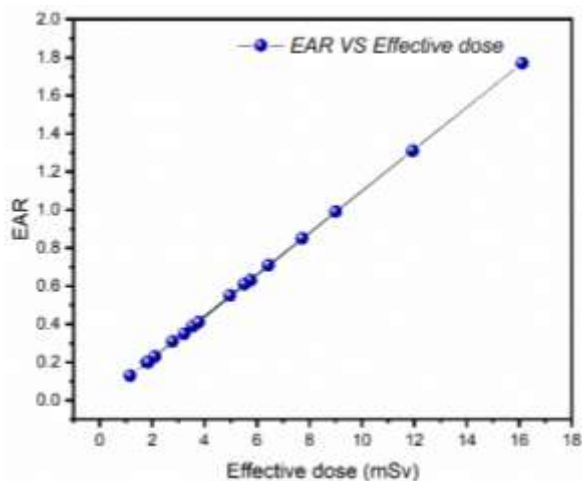


Fig. 5. Correlation between effective and excess absolute risk (EAR) in different pelvic CBCT protocols

This study emphasizes the importance of implementing several optimization strategies to minimize radiation exposure during CBCT imaging. These include:

- Lowering mAs settings: Reducing mAs settings can significantly decrease effective dose and EAR. For example, switching from the 1456 mAs default in the Pelvis Large protocol to the 698 mAs in the Pelvis Large Fast protocol resulted in a 63 % reduction in effective dose (from 38.44 mSv to 18.43 mSv) and a corresponding decrease in EAR.

- Reducing scan times: Shorter scan times lead to lower radiation exposure. In our study, the Pelvis Fast protocol with a 21.2 s scan time achieved an effective dose of 4.97 mSv and an EAR of 0.55, significantly lower than the 36.7 s scan time in the Pelvis protocol which resulted in an effective dose of 9.00 mSv and an EAR of 0.99.

- Optimizing field size: As demonstrated by our findings, smaller field sizes significantly reduce radiation exposure. In the Pelvis Large Fast protocol, a 10×10 cm field size yielded an effective dose of 5.52 mSv and an EAR of 0.61, compared to 1.85 mSv and 0.20 respectively for a 3.3×3.3 cm field size. This represents a 67 % reduction in effective dose and a 68 % reduction in EAR, highlighting the substantial impact of field size optimization.

By adopting these optimization strategies, healthcare providers can effectively minimize radiation exposure during CBCT imaging, leading to a significant reduction in the risk of secondary cancers for their patients. This study provides valuable insights for optimizing CBCT protocols and ensuring safe and responsible medical imaging practices.

Discussions and conclusion

The study demonstrates a clear correlation between CBCT field size and effective dose: larger fields result in higher radiation exposure, highlighting the importance of optimizing field sizes to reduce risks. Specifically, the Pelvis Large Fast protocol's smaller field size (3.3×3.3 cm) yielded a significantly lower effective dose of 1.85 mSv compared to 5.52 mSv from a 10×10 cm field. Moreover, selecting the appropriate imaging protocol significantly impacts secondary cancer risk, as evidenced by the lower EAR of 0.55 in the Pelvis Fast protocol compared to 1.77 in the Pelvis Large protocol. These findings underscore the need for careful protocol selection and field size optimization to enhance patient safety by minimizing radiation exposure and associated cancer risks.

Authors' contribution: Sundus Osman Investigation, Formal analysis, Visualization, Writing – original draft preparation, Writing – review, and editing; Reda Venskauskaitė Methodology, Writing – original draft preparation; Reda Čerapaitė-Trušinskiene Formal analysis, Writing – review, and editing; Jurgita Laurikaitiene – Conceptualization, Visualization, Methodology, Resources, Writing – original draft preparation, Writing review, and editing.

Acknowledgments, sources of funding. This research was supported by the Research Council of Lithuania (project grant No. P-ST-24-271).

References

Altergot, A., Schürmann, M., Jungert, T., Auerbach, H., Nüsken, F., Palm, J., Rube, C., Rube, C. E., & Dzierma, Y. (2023). Imaging doses for different CBCT protocols on the Halcyon 3.0 linear accelerator – TLD measurements in an anthropomorphic phantom. *Z. Med. Phys.*, 34(4), 580–595. <https://doi.org/10.1016/j.zemedi.2023.03.002>

Buxi, T.B.S., Yadav, A., Rawat, K.S., & Ghuman, S.S. (2014). Effect of iterative reconstructions in low dose computed tomography. *Journal of Biomedical Graphics and Computing*, 4(3), 1. <https://doi.org/10.5430/jbgc.v4n3p1>

Iliopoulos, P., Simopoulou, F., Simopoulos, V., Kyrgias, G., & Theodorou, K. (2023). Review on cone beam computed tomography (CBCT) dose in patients undergoing image guided radiotherapy (IGRT). In O.A. Osibote & E. Eppard (Eds.), *Advances in Dosimetry and New Trends in Radiopharmaceuticals*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1002683>

Khan, M., Sandhu, N., Naeem, M., Ealden, R., Pearson, M., Ali, A., Honey, I., Webster, A., Eaton, D., & Ntentas, G. (2022). Implementation of a comprehensive set of optimised CBCT protocols and validation through imaging quality and dose audit. *British Journal of Radiology*, 95(1139), 20220070. <https://doi.org/10.1259/bjr.20220070>

Lau, Y.S., Chew, M.T., Alqahtani, A., Jones, B., Hill, M.A., Nisbet, A., & Bradley, D.A. (2021). Low dose ionising radiation-induced hormesis: Therapeutic implications to human health. *Applied Sciences*, 11(19), 8909. <https://doi.org/10.3390/app11198909>

Simonetto, C., Wollschläger, D., Kundrát, P., Ulanowski, A., Becker, J., Castelletti, N., Güthlin, D., Shemiakina, E., & Eidemüller, M. (2021). Estimating long-term health risks after breast cancer radiotherapy: Merging evidence from low and high doses. *Radiation and Environmental Biophysics*, 60(3), 459–474. <https://doi.org/10.1007/s00411-021-00924-8>

Отримано редакцією збірника / Received: 12.09.24

Прорецензовано / Revised: 26.09.24

Схвалено до друку / Accepted: 23.10.24

Сундус ОСМАН¹, магістр

e-mail: Sundus.osman@ktu.edu

Реда ВЕНСКАУСКАЙТЕ¹, магістр

e-mail: reda.venskauskaite@ktu.edu

Реда ЧЕРАПАЙТЕ-ТРУШІНСКІЄНЕ², д-р філософії (фізика)

ORCID ID 0000-0001-6451-3356

e-mail: reda.cerapaite-trusinskiene@lsmu.lt

Юргіта ЛАУРІКАЙТІЄНЕ^{1,3}, доц.

ORCID ID 0000-0002-4485-381X

e-mail: jurgita.laurikaitiene@ktu.lt

¹Каунаський технологічний університет, Каунас, Литва,

²Литовський університет медичних наук, Каунас, Литва,

³Лікарня Литовського університету медичних наук Каунаська клініка, Каунас, Литва

ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКУ ВТОРИННОГО РАКУ ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОТОКОЛІВ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ТАЗОВОЇ КОНІЧНОЇ ПРОМЕНЕВОЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ ТОМОГРАФІЇ

Вступ. У цьому дослідженні оцінюються ризики вторинного раку, пов'язані з низькими дозами іонізуючого випромінювання, за допомогою протоколів візуалізації тазової конусно-променевої комп'ютерної томографії (КПКТ) у контексті променевої терапії з візуальним контролем (ПТВК).

Методи. Дослідження виявило, що ефективна доза суттєво змінюється залежно від вибору протоколу та розміру поля; більші поля призводять до вищих доз, що вказує на необхідність оптимізації, щоб збалансувати точність діагностики та безпеку.

Результати. Такі протоколи, як протокол для тазу Pelvis Fast, що характеризуються зниженням значення попередньо встановленого параметра міліампер-секунда і коротшим часом сканування, демонструють значно нижчі ефективні дози порівняно з такими альтернативами, як протокол для тазу Pelvis Large, що означає зниження значення надлишкового абсолютного ризику (НАР) розвитку вторинного раку.

Висновки. Аналізуючи використання моделі BEIR VII для оцінювання ризику доходимо висновку про важливість вибору протоколів візуалізації з

нижчими значеннями НАР для ефективного зниження ризиків вторинного раку. Зроблені висновки вказують на важливість значення вибору протоколу для зниження радіаційного опромінення при збереженні високої якості зображення та надають цінні рекомендації для підвищення безпеки пацієнтів під час отримання медичних зображень.

Ключові слова: *малі дози, оцінка ризику, лінійний прискорювач, антропоморфний фантом.*

Автори С. Осман, Р. Венскаускайте, Р. Черапайте-Трушінскієне та Ю. Лаурикайтієне заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors S. Osman, R. Venskauskaitė, R. Čerapaitė-Trušinskiene and J. Laurikaitiene declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

ВЕБІНАР
"МЕНТАЛЬНЕ ЗДОРОВ'Я
ПРИ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ В УКРАЇНІ:
ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ"
WEBINAR
"MENTAL HEALTH
DURING EMERGENCY SITUATIONS IN UKRAINE:
RESEARCH AND RECOMMENDATIONS"

УДК 616.85/039/008.47:616.89/008.441.44/084
DOI: <https://doi.org/10.17721/3041-1491/2024.11-45>

Станіслав ЧУМАК, канд. мед. наук
ORCID ID: 0000-0001-7947-648X
e-mail: dr.stanislav.chumak@gmail.com

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Ірина ПЕРЧУК, канд. мед. наук, провід. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0002-2537-2113
e-mail: iperchuk76@gmail.com

Державна установа "Національний науковий центр
радіаційної медицини, гематології та онкології
Національної академії медичних наук України", Київ, Україна

ПОРІВНЯЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА СУЇЦИДАЛЬНОЇ ПОВЕДІНКИ
ВЕТЕРАНІВ ОПЕРАЦІЇ ОБ'ЄДНАНИХ СИЛ НА СХОДІ УКРАЇНИ
І ЛІКВІДАТОРІВ НАСЛІДКІВ
АВАРІЇ НА ЧОРНОБИЛЬСЬКІЙ АТОМНІЙ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

Вступ. Розглянуто проблеми суїцидальної поведінки серед ліквідаторів аварії на Чорнобильській атомній електростанції та ветеранів Операції Об'єднаних сил на Сході України. Незважаючи на формально відмінні обставини двох різних надзвичайних ситуацій, проблеми у ветеранів та ліквідаторів часто схожі, що веде до подібних порушень, зокрема суїцидальної поведінки.

Методи. Аналіз даних вказує на високий рівень суїцидальних випадків у певні періоди серед ліквідаторів, що акцентує потребу в покращенні медичної та психологічної підтримки, а також у соціальних програмах для адаптації до нових реалій після аварії.

Результати. Ветерани, які повертаються з війни, стикаються з серйозними психічними проблемами, такими як посттравматичний стресовий розлад, депресія і тривожність, що ускладнює їхню реінтеграцію в цивільне життя і також може призводити до суїцидальної поведінки. Хоча існуючі програми підтримки та лікування для ліквідаторів аварії на Чорнобильській атомній електростанції мають тривалий досвід, профілактика суїцидів залишається проблемним питанням.

© Чумак Станіслав, Перчук Ірина, 2024

Висновки. *Проведений порівняльний аналіз обох груп вказує на важливість розробки цільових програм підтримки з урахуванням міжнародного досвіду, а також необхідність додаткових ресурсів та заходів для покращення психічного здоров'я та запобігання суїцидам, як з наукової точки зору, так і в практичній площині.*

Ключові слова: *суїцид, аутоагресивна поведінка, надзвичайні ситуації, ветерани Операції Об'єднаних сил на Сході України, ліквідатори наслідків аварії на Чорнобильській АЕС.*

Вступ

Самогубство є серйозною глобальною проблемою в галузі громадського здоров'я. Щороку у світі від самогубства помирає 703 000 людей. Самогубство є однією з основних причин смерті, перевищуючи за кількістю смерті від малярії, вірусу імунодефіциту людини / синдрому набутого імунодефіциту, раку молочної залози та війни чи вбивств. У 2019 р. самогубство стало причиною більше ніж 1,3 % усіх смертей (World Health Organization, 2021, p. 1). Незважаючи на десятиліття досліджень суїцидальних думок і поведінки, прогнозування ризику самогубства залишається складним завданням (Franklin et al., 2017; Turecki et al., 2019). Серед загально вивчених факторів ризику суїцидальних думок і поведінки – попередні суїцидальні думки та дії (Ribeiro et al., 2016) попередні спроби самогубства (Suárez-Pinilla et al., 2020) і несприятливі життєві події (Liu, & Miller, 2014). Психіатричні супутні розлади, зокрема депресія, вживання психоактивних речовин та психози, є значними факторами ризику для завершених самогубств (Bachmann, 2018, p. 1425).

Порушення психічного здоров'я є визнаною міжнародною медико-соціальною проблемою, що виникла внаслідок Чорнобильської катастрофи. Експерти Чорнобильського форуму ООН (World Health Organization, 2006, p. 160) виділили чотири основні нейропсихіатричні наслідки катастрофи: 1) стресові розлади; 2) ефекти на головний мозок, що розвиваються; 3) органічні ураження мозку у ліквідаторів наслідків аварії (ЛНА) на Чорнобильській атомній електростанції (ЧАЕС); і 4) суїциди. Схожі ефекти можна очікувати і у ветеранів Операції Об'єднаних сил на Сході України (ООС), за винятком впливу на головний мозок, що розвивається. Водночас наслідки катастрофи на ЧАЕС, очевидно, не можна пояснити тільки радіацією. Драматичні соціальні зміни, недостатня інформаційна та соціальна політика уряду, психосоціальний вплив і стресові розлади (посттравматичний стресовий розлад (ПТСР), депресія, тривожність, соматоформні та психосоматичні розлади, зловживання психоактивними речовинами (ПАР), самогубства) після радіаційних надзвичайних ситуацій мають велике значення (Loganovsky, 2015).

Надзвичайні ситуації є природним експериментом, який може дати уявлення про джерела популяційної варіабельності рівнів самогубств (Bromet, & Dew, 1995). Враховуючи добре задокументоване різке збільшення психопатології після катастроф (van Griensven et al., 2006), докази того, що така психопатологія може зберігатися протягом років після події (Adams, Boscarino, & Galea, 2006), а також більшу ймовірність самогубства серед осіб із

психопатологією (Zivin et al., 2007), можна очікувати, що рівень самогубств може також зрости після таких подій. Відомо, що переживання надзвичайних ситуацій різного характеру пов'язане з підвищеним ризиком розвитку симптомів депресивних, тривожних та постстресових розладів (World Health Organization, 2013, p. 110; Geoffrion et al., 2022), а також з підвищенням частоти суїцидальних спроб (Safarpour et al., 2020).

Метою дослідження було провести порівняльний аналіз окремих аспектів суїцидальної поведінки у ветеранів Операції Об'єднаних сил на Сході України і ліквідаторів наслідків аварії на Чорнобильській атомній електростанції. Для досягнення мети було проведено аналіз літератури та використано результати власних досліджень.

Методи

За даними літератури та власних досліджень проведено порівняльний аналіз окремих чинників (біологічних, психологічних, соціальних), що вплинули на розвиток суїцидальної поведінки у ветеранів ООС та ЛНА на ЧАЕС. Дослідження були долучені, якщо вони відповідали таким критеріям: 1) основний змодельований результат був чітко визначений як суїцидальні думки, спроба самогубства або завершене самогубство; 2) простір вхідних характеристик містив принаймні один предиктор, отриманий в одному (або кількох) із таких трьох доменів: біологічного, психологічного та соціального; 3) дослідження стосувалось ветеранів ООС або ЛНА на ЧАЕС.

Результати

Протягом 6,5 років спостережень за 4742 естонськими ліквідаторами зареєстровано 144 випадки смерті, з яких 28 осіб (19,4 %) здійснили самогубство, що вказує на статистично значущу перевищену частоту суїцидів серед цієї групи порівняно з неопроміненими відповідного віку. Довготривало підвищений ризик суїцидів серед ЛНА є яскравим свідченням того, що порушення психічного здоров'я залишаються однією з найсерйозніших проблем громадського здоров'я, викликаних катастрофою. Двадцятишестирічне проспективне спостереження за когортами естонських ЛНА підтверджує наявність надлишкової смертності від самогубств (Rahu et al., 2013). Подібно до цього у литовських ліквідаторів також спостерігається підвищена смертність від самогубств порівняно із загальною популяцією Литви (Kesminiene, Kurtinaitis, & Rimdeika, 1997). Аналіз смертності за п'ятирічний період (1989–1994) у Киргизстані показав, що самогубства були найпоширенішою причиною смерті серед осіб, які піддавалися впливу іонізуючого опромінення. Приблизно чверть усіх смертей припадала на самогубства, а якщо врахувати вживання великих доз алкоголю як форму самогубства, ця цифра підвищиться ще більше (Kamarli, & Abdulina, 1996).

Відділ радіаційної психоневрології Національного наукового центру радіаційної медицини провів стандартизовані психіатричні інтерв'ю з 295 ліквідаторами та 397 контрольними особами через 16–18 років після катастрофи, використовуючи Composite International Diagnostic Interview (CIDI). Результати

показали підвищену частоту психіатричних розладів, ідей про самогубство та важких головних болей серед ліквідаторів. До катастрофи ліквідатори мали менші показники тривожності та алкогольних розладів, але після катастрофи у них виявилися значно вищі рівні депресії (18,0 % проти 13,1 %) та ідей про самогубство (9,2 % проти 4,1 %). У році, що передував інтерв'ю, показники депресії (14,9 % проти 7,1 %), ПТСР (4,1 % проти 1,0 %) та головних болей (69,2 % проти 12,4 %) були підвищені. Ліквідатори з депресією та ПТСР втрачали більше робочих днів порівняно з контрольними особами. Рівень опромінення був пов'язаний із тяжкістю соматичних симптомів та ПТСР. Отже, довгострокові наслідки катастрофи на Чорнобильській АЕС для психічного здоров'я були чітко виявлені у ЛНА (Loganovsky et al., 2008).

За результатами дослідження, яке провели фахівці Інституту психіатрії Київського національного університету імені Тараса Шевченка, було проаналізовано 175 анкет щодо завершених суїцидів серед ветеранів ООС за період з 2014 по 2019 роки. Вивчено соціально-демографічні характеристики цих осіб та узагальнені дані про тривалість перебування в зоні бойових дій, зайнятість після демобілізації, наявність залежностей від ПАР та інші фактори, що передували самогубству. До найбільш значимих чинників належать:

1. Самогубства та тривалість перебування в зоні бойових дій: найбільша кількість самогубств серед військовослужбовців ООС (83,95 %) сталася після перебування в зоні бойових дій понад 3 місяці. Це вказує на необхідність коригування термінів ротації та проведення превентивних заходів для зменшення ризику суїциду.

2. Сімейні стосунки: понад половина досліджуваних (59,52 %) мали доброзичливі стосунки в родині, тоді як 26,19 % мали формальні стосунки, а 14,29 % – конфліктні ситуації. Сімейні негаразди чи розриви стосунків формально не були вирішальним фактором для самогубств, проте високий відсоток формальних і конфліктних стосунків (40,48 %) свідчить про необхідність підтримки з боку родини або відповідних фахівців.

3. Релігійність: 80 % ветеранів зрідка відвідували храми і були формально віруючими, 7,33 % часто відвідували церкву, а 12,67 % були атеїстами.

4. Психічний стан: у досліджуваних спостерігалися замкненість (18,25 %), тривожність (17,46 %), роздратованість (16,67 %), агресивність і скритність (по 10,32 %), низька комунікабельність (9,52 %), підвищена чутливість і схильність драматизувати (по 4,76 %), недовірливість і бажання усамотнитися (по 3,97 %).

5. Схильність до вживання ПАР: 46,71 % померлих ветеранів перебували у стані алкогольного чи наркотичного сп'яніння на момент скоєння суїциду, із них 41,35 % зловживали алкоголем і 2,83 % вживали наркотики.

6. Психологічна допомога: 13,21 % ветеранів, які здійснили самогубство, мали спроби самогубства раніше і потребували допомоги. Переважна більшість (88,99 %) не отримувала спеціалізованої підтримки, що вказує на

необхідність у поліпшенні доступу до медико-психологічної допомоги для цієї категорії ветеранів (Pinchuk et al., 2020).

Виходячи з результатів вищезазначених досліджень, для порівняння психічного здоров'я ветеранів ООС та ЛНА на ЧАЕС слід розглянути кілька основних спільних аспектів:

1. *Соціальна підтримка та інтеграція*: обидві групи часто відчувають недостатню соціальну підтримку, що може погіршувати їхній психічний стан.

2. *Потреба у спеціалізованій допомозі*: обидві групи потребують спеціалізованої медичної та психологічної допомоги, яка враховує специфіку їхніх травматичних досвідів.

3. *Вплив на сім'ї*: проблеми із психічним здоров'ям можуть суттєво впливати на сімейні відносини, що важливо враховувати при наданні допомоги.

Основні аспекти суїцидів серед ліквідаторів ЧАЕС:

1. *Фізичні наслідки*: багато ліквідаторів отримали високі дози радіації, що призвело до різних захворювань, включаючи рак та інші серйозні хвороби. Постійний біль і погіршення здоров'я можуть стати чинником для суїцидальних думок.

2. *Психологічний стрес*: стрес від виконання небезпечної роботи, пережитий під час ліквідації наслідків аварії, а також ПТСР, що розвинувся у багатьох, суттєво вплинули на психічне здоров'я.

3. *Соціальні та економічні фактори*: після аварії багато ліквідаторів зіткнулися з проблемами соціальної адаптації, економічною нестабільністю, відсутністю належної медичної допомоги та підтримки з боку держави.

4. *Стигматизація та ізоляція*: деякі ліквідатори відчували стигматизацію через свій стан здоров'я або через страх інших людей перед радіаційним забрудненням, що могло призвести до соціальної ізоляції.

Основні аспекти суїцидів серед ветеранів ООС:

Ветерани, які повертаються з війни, часто стикаються із психологічними проблемами, такими як ПТСР, депресія, тривога та інші психічні розлади. Ці проблеми можуть ускладнювати адаптацію до мирного життя, спричиняти соціальну ізоляцію та економічну нестабільність, що, своєю чергою, може призводити до суїцидальних думок та дій.

Міжнародний консенсус щодо психічних проблем після Чорнобиля (World Health Organization, 2006, 160 p.):

1. ПТСР, депресія, тривожність, соматоформні та психосоматичні розлади, зловживання алкоголем: тут існує повна узгодженість думок експертів; рекомендуються дослідження тривалості життя, а також необхідні психологічний та психіатричний моніторинг і допомога.

2. Вплив на мозок, що розвивається (когнітивні порушення, емоційно-поведінкові розлади, дефіцит уваги та гіперактивність, нейророзвивальні розлади): у цьому питанні тривають активні обговорення з суперечностями; необхідно подальше дослідження ефектів, рекомендуються дослідження тривалості життя з можливими втручаннями.

3. Органічне пошкодження мозку у ліквідаторів (цереброваскулярні захворювання, нейрокогнітивні дефіцити, демієлінізуючі захворювання нервової системи, пароксизмальні стани тощо): проблема обговорюється; необхідні подальші дослідження, зокрема дослідження тривалості життя; потрібен постійний нейропсихіатричний моніторинг і допомога.

4. Самогубства: тут існує повна узгодженість думок експертів; необхідні подальші дослідження, терміново потрібні специфічні підходи до профілактики самогубств.

Наразі, міжнародний консенсус щодо психічних проблем серед ветеранів ООС ще не сформовано, і для його формування, очевидно, потребується достатньо велика кількість відповідних досліджень. Але на сьогодні можна стверджувати, що основні проблеми психічного здоров'я, з якими стикалися ЛНА на ЧАЕС (окрім впливу на мозок, що розвивається, пов'язаний із безпосереднім ефектом іонізуючого випромінювання), будуть подібними і для ветеранів ООС. Таке порівняння дозволяє зрозуміти унікальні виклики, з якими стикаються ветерани ООС та ЛНА на ЧАЕС, і наголосити на важливості розробки цільових програм підтримки для ветеранів ООС з урахуванням досвіду ЛНА на ЧАЕС.

Дискусія і висновки

Результати дослідження показують, що під час надзвичайних ситуацій ветерани ООС та ЛНА на ЧАЕС зазнали значного психічного стресу, однак більшість із них не зверталася до медичних закладів для лікування або профілактики після повернення додому. Відсутність належної медико-соціальної та психологічної підтримки може бути однією з причин суїцидів серед цієї категорії осіб, особливо в стані алкогольного або наркотичного сп'яніння. Дані дослідження вказують на актуальність проблеми суїцидів серед ветеранів ООС в Україні та необхідність подальших досліджень психічного здоров'я цих осіб, зокрема їхньої суїцидальної поведінки. Для ефективного вирішення проблеми важливо адаптувати та впровадити міжнародні програми діагностики, лікування та реабілітації ветеранів військових конфліктів. Підтримка міждисциплінарного підходу, який передбачає участь фахівців із медичних і психологічних спеціальностей, а також представників різних відомств, дозволить розробити та реалізувати комплексні медико-психологічні та соціальні заходи в рамках біопсихосоціальної моделі допомоги. Також необхідно створити національний реєстр здоров'я ветеранів і забезпечити довгостроковий (бажано довічний) моніторинг за допомогою високоякісних клініко-епідеміологічних досліджень з міжнародною участю.

Внесок авторів: Станіслав Чумак – концептуалізація, методологія; формальний аналіз; написання – оригінальна чернетка; Ірина Перчук – концептуалізація, написання – перегляд і редагування.

Список використаних джерел

Adams, R.E., Boscarino, J.A., & Galea, S. (2006). Social and psychological resources and health outcomes after the World Trade Center disaster. *Social Science & Medicine*, 62, 176–188. <https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2005.05.008>

- Bachmann, S. (2018). Epidemiology of suicide and the psychiatric perspective. *Int. J. Environ Res. Public Health*, 15(7), 1425. <https://doi.org/10.3390/ijerph15071425>
- Bromet, E., & Dew, M.A. (1995). Review of psychiatric epidemiologic research on disasters. *Epidemiologic Reviews*, 17(1), 113–119. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.epirev.a036166>
- Franklin, J.C., Ribeiro, J.D., Fox, K.R., Bentley, K.H., Kleiman, E.M., Huang, X., Musacchio, K.M., Jaroszewski, A.C., Chang, B.P., & Nock, M.K. (2017). Risk factors for suicidal thoughts and behaviors: a meta-analysis of 50 years of research. *Psychol. Bull.*, 143(2), 187–232. <https://doi.org/10.1037/bul0000084>
- Geoffrion, S., Goncalves, J., Robichaud, I., Sade, J., Giguère, C.-É., Fortin, M., Lamothe, J., Bernard, P., & Guay, S. (2022). Systematic Review and Meta-Analysis on Acute Stress Disorder: Rates Following Different Types of Traumatic Events. *Trauma, Violence & Abuse*, 23(1), 213–223. <https://doi.org/10.1177/1524838020933844>
- Kamarli, Z., & Abdulina, A. (1996). Health conditions among workers who participated in the cleanup of the Chernobyl accident. *World health statistics quarterly. Rapport trimestriel de statistiques sanitaires mondiales*, 49(1), 29–31. <https://iris.who.int/handle/10665/54051>
- Kesminiene, A.Z., Kurtinaitis, J., & Rimdeika, G. (1997). The study of Chornobyl clean-up workers from Lithuania. *Acta Med. Lituanica*, 2, 55–61.
- Liu, R.T., & Miller, I. (2014). Life events and suicidal ideation and behavior: a systematic review. *Clin. Psychol. Rev.*, 34(3), 181–92. <https://doi.org/10.1016/j.cpr.2014.01.006>
- Loganovsky, K. (2015). Overview of mental health and neuropsychiatric disorders in Ukrainian Chernobyl survivors. Cooperation on Chernobyl Health Research (CO-CHER) In *Mental Health and Risk Communication Expert meeting*, 23–24 June 2015, IARC WHO.
- Loganovsky, K., Havenaar, J.M., Tintle, N.L., Guey, L.T., Kotov, R., & Bromet, E.J. (2008). The mental health of clean-up workers 18 years after the Chernobyl accident. *Psychol. Med.*, 38(4), 481–488. <https://doi.org/10.1017/S0033291707002371>
- Pinchuk, I.Y., Boltonosov, S.V., Atamanchuk, N.V., Stepanova, N.M., Yachnik, Y.V., Vitrenko, A.O., Gunko, N.V., & Loganovsky, K.M. (2020). Study of suicide behavior in Joint force operation veterans in Eastern Ukraine and in liquidators of the consequences of the Chornobyl accident. *Problems of Radiation Medicine and Radiobiology*, 25, 230–248. <https://doi.org/10.33145/2304-8336-2020-25-230-248>
- Rahu, K., Auvinen, A., Hakulinen, T., Tekkel, M., Inskip, P.D., Bromet, E.J., Boice Jr, J.D., & Rahu, M. (2013). Chernobyl cleanup workers from Estonia: follow-up for cancer incidence and mortality. *J. Radiol. Prot.*, 33(2), 395–411. <https://doi.org/10.1088/0952-4746/33/2/395>
- Ribeiro, J.D., Franklin, J.C., Fox, K.R., Bentley, K.H., Kleiman, E.M., Chang, B.P., & Nock, M.K. (2016). Self injurious thoughts and behaviors as risk factors for future suicide ideation, attempts, and death: a meta-analysis of longitudinal studies. *Psychol. Med.*, 46(2), 225–236. <https://doi.org/10.1017/S0033291715001804>
- Safarpour, H., Sohrabizadeh, S., Malekian, L., Safi-Keykaleh, M., Pirani, D., Daliri, S., & Bazayr, J. (2020). Suicide Death Rate after Disasters: A Meta-Analysis Study. *Archives of suicide research: official journal of the International Academy for Suicide Research*, 26(1), 14–27. <https://doi.org/10.1080/13811118.2020.1793045>
- Suárez-Pinilla, P., Pérez-Herrera, M., Suárez-Pinilla, M., Medina-Blanco, R., López-García, E., Artal-Simón, J.Á., & de Santiago-Díaz, A.I. (2020). Recurrence of suicidal thoughts and behaviors during one year of follow-up: an exploratory study. *Psychiatry Res.*, 288, 112988. <https://doi.org/10.1016/j.psychres.2020.112988>
- Turecki, G., Brent, D.A., Gunnell, D., O'Connor, R.C., Oquendo, M.A., Pirkis, J., & Stanley, B.H. (2019). Suicide and suicide risk. *Nat. Rev. Dis. Primer.*, 5(1), 1–22. <https://doi.org/10.1038/s41572-019-0121-0>
- Van Griensven, F., Chakkraband, M.L.S., Thienkrua, W., Pengjuntr, W., Cardozo, B.L., Tantipiwatanaskul, P., ... & Tappero, J.W. (2006). Mental health problems among adults in tsunami-affected areas in southern Thailand. *JAMA*, 296(5), 537–548. <https://doi.org/10.1001/jama.296.5.537>
- World Health Organization. (2006). Health effects of the Chernobyl accident and special health care programmes. In B. Bennet, M. Repacholli, & Zh. Carr (Eds.), *Report of the UN Chernobyl Forum Expert Group "Health" (EGH)*. WHO.

World Health Organization. (2013). *Building back better: sustainable mental health care after emergencies*. WHO.

World Health Organization. (2021). *Suicide worldwide in 2019*. WHO.

Zivin, K., Kim, H.M., McCarthy, J.F., Austin, K.L., Hoggatt, K.J., Walters, H., Valenstein, M. (2007). Suicide mortality among individuals receiving treatment for depression in the Veterans Affairs health system: associations with patient and treatment setting characteristics. *American journal of public health*, 97(12), 2193–2198. <https://doi.org/10.2105/AJPH.2007.115477>

References

Adams, R.E., Boscarino, J.A., & Galea, S. (2006). Social and psychological resources and health outcomes after the World Trade Center disaster. *Social Science & Medicine*, 62, 176–188. <https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2005.05.008>

Bachmann, S. (2018). Epidemiology of suicide and the psychiatric perspective. *Int. J. Environ Res. Public Health*, 15(7), 1425. <https://doi.org/10.3390/ijerph15071425>

Bromet, E., & Dew, M.A. (1995). Review of psychiatric epidemiologic research on disasters. *Epidemiologic Reviews*, 17(1), 113–119. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.epirev.a036166>

Franklin, J.C., Ribeiro, J.D., Fox, K.R., Bentley, K.H., Kleiman, E.M., Huang, X., Musacchio, K.M., Jaroszewski, A.C., Chang, B.P., & Nock, M.K. (2017). Risk factors for suicidal thoughts and behaviors: a meta-analysis of 50 years of research. *Psychol. Bull.*, 143(2), 187–232. <https://doi.org/10.1037/bul0000084>

Geoffrion, S., Goncalves, J., Robichaud, I., Sade, J., Giguère, C.-É., Fortin, M., Lamothe, J., Bernard, P., & Guay, S. (2022). Systematic Review and Meta-Analysis on Acute Stress Disorder: Rates Following Different Types of Traumatic Events. *Trauma, Violence & Abuse*, 23(1), 213–223. <https://doi.org/10.1177/1524838020933844>

Kamarli, Z., & Abdulina, A. (1996). Health conditions among workers who participated in the clean-up of the Chernobyl accident. *World health statistics quarterly. Rapport trimestriel de statistiques sanitaires mondiales*, 49(1), 29–31. <https://iris.who.int/handle/10665/54051>

Kesminiene, A.Z., Kurtinaitis, J., & Rimdeika, G. (1997). The study of Chornobyl clean-up workers from Lithuania. *Acta Med. Lituanica*, 2, 55–61.

Liu, R.T., & Miller, I. (2014). Life events and suicidal ideation and behavior: a systematic review. *Clin. Psychol. Rev.*, 34(3), 181–92. <https://doi.org/10.1016/j.cpr.2014.01.006>

Loganovsky, K. (2015). Overview of mental health and neuropsychiatric disorders in Ukrainian Chernobyl survivors. Cooperation on Chernobyl Health Research (CO-CHER) In *Mental Health and Risk Communication Expert meeting*, 23–24 June 2015, IARC WHO.

Loganovsky, K., Havenaar, J.M., Tintle, N.L., Guey, L.T., Kotov, R., & Bromet, E.J. (2008). The mental health of clean-up workers 18 years after the Chernobyl accident. *Psychol. Med.*, 38(4), 481–488. <https://doi.org/10.1017/S0033291707002371>

Pinchuk, I.Y., Boltonosov, S.V., Atamanchuk, N.V., Stepanova, N.M., Yachnik, Y.V., Vitrenko, A.O., Gunko, N.V., & Loganovsky, K.M. (2020). Study of suicide behavior in Joint force operation veterans in Eastern Ukraine and in liquidators of the consequences of the Chornobyl accident. *Problems of Radiation Medicine and Radiobiology*, 25, 230–248. <https://doi.org/10.33145/2304-8336-2020-25-230-248>

Rahu, K., Auvinen, A., Hakulinen, T., Tekkel, M., Inskip, P.D., Bromet, E.J., Boice Jr, J.D., & Rahu, M. (2013). Chernobyl cleanup workers from Estonia: follow-up for cancer incidence and mortality. *J. Radiol. Prot.*, 33(2), 395–411. <https://doi.org/10.1088/0952-4746/33/2/395>

Ribeiro, J.D., Franklin, J.C., Fox, K.R., Bentley, K.H., Kleiman, E.M., Chang, B.P., & Nock, M.K. (2016). Self injurious thoughts and behaviors as risk factors for future suicide ideation, attempts, and death: a meta-analysis of longitudinal studies. *Psychol. Med.*, 46(2), 225–236. <https://doi.org/10.1017/S0033291715001804>

Safarpour, H., Sohrabizadeh, S., Malekian, L., Safi-Keykaleh, M., Pirani, D., Daliri, S., & Bazyar, J. (2020). Suicide Death Rate after Disasters: A Meta-Analysis Study. *Archives of suicide research : official journal of the International Academy for Suicide Research*, 26(1), 14–27. <https://doi.org/10.1080/13811118.2020.1793045>

Suárez-Pinilla, P., Pérez-Herrera, M., Suárez-Pinilla, M., Medina-Blanco, R., López-García, E., Artal-Simón, J.Á., & de Santiago-Díaz, A.I. (2020). Recurrence of suicidal thoughts and behaviors during one year of follow-up: an exploratory study. *Psychiatry Res.*, 288, 112988. <https://doi.org/10.1016/j.psychres.2020.112988>

Turecki, G., Brent, D.A., Gunnell, D., O'Connor, R.C., Oquendo, M.A., Pirkis, J., & Stanley, B.H. (2019). Suicide and suicide risk. *Nat. Rev. Dis. Primer.*, 5(1), 1–22. <https://doi.org/10.1038/s41572-019-0121-0>

Van Griensven, F., Chakkraband, M.L.S., Thienkrua, W., Pengjuntr, W., Cardozo, B.L., Tantipiwatanskul, P., ... & Tappero, J.W. (2006). Mental health problems among adults in tsunami-affected areas in southern Thailand. *JAMA*, 296(5), 537–548. <https://doi.org/10.1001/jama.296.5.537>

World Health Organization. (2006). Health effects of the Chernobyl accident and special health care programmes. In B. Bennet, M. Repacholli, & Zh. Carr (Eds.), *Report of the UN Chernobyl Forum Expert Group "Health" (EGH)*. WHO.

World Health Organization. (2013). *Building back better: sustainable mental health care after emergencies*. WHO.

World Health Organization. (2021). *Suicide worldwide in 2019*. WHO.

Zivin, K., Kim, H.M., McCarthy, J.F., Austin, K.L., Hoggatt, K.J., Walters, H., Valenstein, M. (2007). Suicide mortality among individuals receiving treatment for depression in the Veterans Affairs health system: associations with patient and treatment setting characteristics. *American journal of public health*, 97(12), 2193–2198. <https://doi.org/10.2105/AJPH.2007.115477>

Отримано редакцію збірника / Received: 01.08.24

Прорецензовано / Revised: 23.08.24

Схвалено до друку / Accepted: 01.10.24

Stanislav CHUMAK, PhD (Med.)

ORCID ID: 0000-0001-7947-648X

e-mail: dr.stanislav.chumak@gmail.com

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Iryna PERCHUK, PhD (Med.), Leading Researcher

ORCID ID: 0000-0002-2537-2113

e-mail: iperchuk76@gmail.com

State Institution "National Scientific Center for Radiation Medicine, Hematology and Oncology

of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine", Kyiv, Ukraine

COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF SUICIDAL BEHAVIOR IN VETERANS OF THE JOINT FORCES OPERATION IN EASTERN UKRAINE AND LIQUIDATORS OF THE CHERNOBYL NUCLEAR POWER PLANT ACCIDENT

Introduction. *This article examines the issues of suicidal behavior among liquidators of the Chernobyl Nuclear Power Plant disaster and veterans of the Joint Forces Operation in eastern Ukraine. Despite the formally different circumstances of these two distinct emergencies, veterans and liquidators often face similar problems, leading to analogous disorders, including suicidal behavior.*

Methods. *Data analysis indicates a high incidence of suicides during certain periods among the liquidators, highlighting the need for improved medical and psychological support, as well as social programs for adaptation to new realities post-disaster.*

Results. *Veterans returning from war encounter severe mental health issues such as post-traumatic stress disorder, depression, and anxiety, which complicates their*

reintegration into civilian life and may also lead to suicidal behavior. Although existing support and treatment programs for Chernobyl disaster liquidators have a long-standing history, suicide prevention remains a challenging issue.

Conclusions. *The comparison of both groups underscores the importance of developing targeted support programs, incorporating international experience, and the necessity for additional resources and measures to improve mental health and prevent suicides from both scientific and practical perspectives.*

Keywords: *suicide, self-harming behavior, emergencies, Joint Forces Operation veterans in eastern Ukraine, Chernobyl NPP disaster liquidators.*

Автори С. Чумак та І. Перчук заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors S. Chumak and I. Perchuk declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

МЕНТАЛЬНЕ ЗДОРОВ'Я СТУДЕНТІВ: ПОТРЕБА У ПІДТРИМЦІ В УМОВАХ ВІЙНИ

Вступ. *Війна в Україні стала відчутним додатковим стресом для більшої частини студентської молоді. Метою публікації є визначення потреби в підтримці та захисті ментального здоров'я у здобувачів вищої освіти в умовах військового конфлікту, а також задоволення цих потреб.*

Методи. *Досліджувалася готовність учасників освітнього процесу звернутися за допомогою до фахівців у сфері психічного здоров'я. Проаналізовано бар'єри та стигми, що заважають студентам отримати своєчасну кваліфіковану допомогу, а також доступність психологічних послуг у вишах. Дослідження проводилося методом онлайн-опитування та фокус-груп. Онлайн-опитування проходило у два етапи та охопило 2511 студентів 17 вишів України.*

Результати. *За результатами дослідження виявлено ознаки погіршення психічного здоров'я у більшості респондентів та невелику кількість звернень з їхнього боку за кваліфікованою допомогою. Встановлено, що найчастіше студенти власні психологічні проблеми вирішували самотужки або зверталися за підтримкою до рідних, друзів та близьких.*

Висновки. *Фокус-групове дослідження за участі 40 студентів та викладачів дозволило виявити більш глибоке розуміння потреби у психологічній підтримці ментального здоров'я здобувачів вищої освіти, визначити певні бар'єри та стереотипи, які перешкоджають їм звертатися за спеціалізованою допомогою. З'ясовано наявні можливості в отриманні психологічної допомоги та досліджено пропозиції щодо надання та поліпшення сервісу психологічної підтримки. Впровадження отриманих результатів у практику вишів України дозволить удосконалити ефективний психологічний супровід студентів під час навчання в умовах війни для підтримання їхнього ментального здоров'я.*

Ключові слова: *ментальне здоров'я, студенти, фокус-група, потреба в підтримці, війна.*

Вступ

Третій рік повномасштабної війни, розв'язаної росією в Україні, негативно вплинув на ментальний та психоемоційний стан здобувачів вищої освіти (Kugarov et al., 2022). Більшість із них перебувають під подвійним стресовим пресингом. З одного боку, – безперервні травмуючі події (часто в найекстремальнішій формі): військові дії, перебування під обстрілами, життя в окупації, втрата житла, загибель близьких та рідних, загроза власній безпеці, що викликають тривожність, паніку, депресію, роздратування, психоемоційне виснаження, апатію тощо (Pavlova, & Rogowska, 2023). З іншого боку, – насичений навчальний процес, який у перспективі дозволяє здобути фах та закласти основу майбутньої кар'єри (Pei et al., 2024). І для студентів вкрай

важливо, незважаючи на стрес, пов'язаний із війною, не втратити мотивацію до навчання та до обраної професії.

Подвійне психологічне навантаження вимагає від учасників освітнього процесу в цих непростих умовах надмірних зусиль, що ставить їх у доволі вразливе психоемоційне становище. І в такій ситуації перебуває більшість учасників освітнього процесу (Hunt, & Eisenberg, 2010).

Наявні наукові дослідження та гіркий досвід інших країн (Murthy, & Lakshminarayana, 2006), що постраждали від збройних конфліктів, свідчать, що негативний вплив війни на ментальне здоров'я, особливо молоді, є багатограним і довготривалим (Кічула та ін., 2024; Raccanello et al., 2024; Sheather, 2022). Навіть у тих, кому вдалося стійко перенести перші місяці військової агресії, не виключено у подальшому, як зазначає міжнародна практика (Hang et al., 2021), може розвинутися цілий спектр негативних проявів психічного здоров'я: психологічне виснаження, різного роду психічні розлади, поведінкові зміни, що можуть стати серйозною перешкодою для їхньої повноцінної участі у повсякденному житті (Jawaid, Gomolka, & Timmer, 2022).

Тож потреба у психологічній підтримці студентської молоді в Україні від початку війни відчутно зросла. Зважаючи на той факт, що ця проблема за останні два роки набула рангу одного з державних пріоритетів, спрямованих на подолання кризових викликів, для збереження ментального здоров'я учасників освітнього процесу нарізла необхідність впровадити у вишах гнучку і водночас ефективну систему психологічної підтримки та профілактичних заходів для створення безпечних, психологічно комфортних умов навчання (Limone, Toto, & Messina, 2022). Водночас варто ввести освітню програму щодо основ збереження ментального здоров'я та психологічної самопомогі.

На жаль, аналіз сучасних наукових напрацювань у сфері підтримання ментального здоров'я здобувачів вищої освіти в умовах повномасштабної військової агресії свідчить про те, що ця тема ще недостатньо і не всебічно досліджена українськими вченими (Martsenkovskyi et al., 2024). Вивченням факторів впливу війни на ментальний стан студентської молоді займалися закордонні науковці М. Yukhymenko-Lescroart, Р. Limone, G. Miller, R. Murthy та вітчизняні – О. Чернякова, Н. Ковальова, Н. Харитоновна, Л. Опанасенко, І. Мартиненко, Л. Карамушка, О. Стахов та інші. Проте дотепер відсутні дослідження щодо визначення потреби у психологічній підтримці з боку самих учасників освітнього процесу під час збройного конфлікту, що зумовлює наукову актуальність зазначеної теми.

Мета публікації – визначити потреби у студентської молоді українських вишів у підтримці та захисті ментального здоров'я в умовах війни, а також задоволення цих потреб.

Методи

Матеріал дослідження представлений у вигляді результатів кількісного (онлайн-опитування) та якісного фокус-групового дослідження. Опитувальник мав такі розділи: соціодемографічний; підтримка психічного здоров'я (питання

про звернення за професійною та непрофесійною підтримкою до і під час війни); самооцінювання ментального здоров'я та благополуччя (за шкалою від 0 до 10 до та після війни); комплекс зі стандартизованих психодіагностичних шкал для виявлення ознак психічних розладів, а саме: посттравматичного стресового розладу (PC-PTSD-5); депресії (PHQ-9); генералізованого тривожного розладу (GAD-7); суїцидальності (PSS); вживання психоактивних речовин (CRAFFT), а також порушень сну (ISI). Ця публікація представляє результати, пов'язані із частиною опитування про психологічну підтримку ментального здоров'я учасників освітнього процесу.

Кількісне дослідження проводилося серед студентів 17 вишів України у два етапи: перший етап охопив період з квітня по червень 2022 року (1113 респондентів); другий етап – з вересня по листопад 2023 року (1398 опитуваних). Більшість учасників обох опитувань були віком 18–20 років (59,7 % і 82 % відповідно) та жіночої статі (78,4 % і 75,5 % відповідно).

Якісне фокус-групове дослідження було проведено для більш глибокого розуміння потреби студентів в отриманні психологічної підтримки під час війни. У шести фокус-групах, проведених у березні-квітні 2024 року, взяли участь 24 студенти віком 19–21 років (факультету психології, інституту біології та медицини КНУ імені Тараса Шевченка, факультету комп'ютерної інженерії та управління Харківського національного університету радіоелектроніки) та 16 викладачів (інституту біології та медицини, економічного факультету, воєнного інституту КНУ імені Тараса Шевченка, факультету комп'ютерної інженерії та управління Харківського національного університету радіоелектроніки), більшість з яких мають стаж роботи понад 20 років. Опитування проходило анонімно. За згодою учасників дискусія супроводжувалась аудіозаписом. Середня тривалість фокус-групи становила 1,5 год.

Учасники фокус-груп обговорили чотири основні питання:

1) які бар'єри заважають студентам звертатися за психологічною або психіатричною допомогою?

2) які стереотипи щодо отримання психологічної або психіатричної допомоги поширені серед студентів?

3) чи здійснюються у вашому навчальному закладі заходи щодо підтримки ментального здоров'я студентської молоді?

4) які послуги з підтримки ментального здоров'я для студентів вважаєте доцільним впровадити на рівні навчального закладу?

Результати фокус-групового дослідження проаналізовано за допомогою стратегій тематичного аналізу (Braun, & Clarke, 2006).

Результати

За результатами проведеного дослідження виявлено низький рівень психологічного благополуччя у переважній більшості українських студентів: у 2022 р. на його низький рівень вказали 75,0 % студентів, а в 2023 р. – 64,9 %. Значна кількість опитаних зазнали впливу травматичних подій 67,4 % (2022) і 91,1 % (2023). Виявлено ознаки порушень психічного здоров'я у студентів:

помірні та важкі симптоми тривоги у 44,7 % (2022) та 34,1 % (2023); помірні та важкі симптоми депресії у 47,2 % (2022) і 33,6 % (2023). Більш детальну інформацію щодо інших результатів можна знайти у відповідних статтях цього дослідження (Pinchuk et al., 2024, p. 121–151).

Незважаючи на погіршення стану ментального здоров'я, за психологічною підтримкою з двох опитаних груп звернувся лише майже кожен сьомий студент – 378 (15 %). Водночас у 2023 р., на другий рік війни, потреба у психологічній допомозі значно зросла, при цьому переважна більшість респондентів надали перевагу особистим консультаціям у фахівців (рис. 1).



Рис. 1. Характеристики пошуку професійної підтримки серед студентів

У 2023 р. найчастіше студенти користувалися послугами психологів (69 %) порівняно з 2022 роком (5,8 %), психотерапевтів (31 % і 4,6 % відповідно) та психіатрів (24 % і 2,7 %). Більше у 2023 р. респонденти зверталися і до сімейних лікарів (16 %), тоді як у 2022 р. їх відвідали лише 1,4 %. Кожен десятий здобувач вищої освіти (10 %) на другий рік війни телефонував на гарячу лінію, у 2022 р. – 1,9 %.

Значна частина студентів у 2023 р. (35 %) стали приймати призначені лікарем медикаментозні препарати, у 2022 р. до них вдавалися 5,2 %, а от без призначення лікаря їх вживала приблизно однакова частка респондентів (у 2022 р. – 11,4 %, у 2023 р. – 16 %). Відносно невелика група студентів відвідувала групи взаємодопомоги (2,3 % у 2022 р. та 7 % у 2023 р.). Натомість пошук психологічної підтримки у рідних, близьких та друзів були поширеними в обох опитуваннях (39,3 % – у 2022 р., 40,3 % – у 2023 р.). Самотужки психотравмуючі бар'єри долали більше половини респондентів (60,9 % у 2022 р. та 55 % у 2023 р.). Загалом, як показали обидва дослідження, потреба у

психологічній допомозі серед студентів у 2023 р. порівняно з 2022 роком відчутно зросла.

Дискусії у фокус-групах показали, що з початку війни стан психічного здоров'я погіршився не тільки у студентів, а й у викладачів. Проте, на думку учасників, звернутися за психологічною підтримкою багатьом студентам перешкоджають ряд бар'єрів та стигм: необізнаність; страх осуду та розголошення; впевненість у здатності впоратися самостійно, фінансові обмеження; недовіра до професіоналізму фахівців; упередженість; нерозуміння суті допомоги; знецінення власних проблем; негативний досвід звернень; брак часу; неготовність "відкритися"; побоювання, що зроблять об'єктом досліджень; упереджена позиція сім'ї.

На перешкоді, на переконання учасників, також стоїть ряд стереотипів: психологічна допомога лише для психічно хворих; звернення до психолога – прояв слабкості; проблеми вирішуються самі собою; страх, що перетворять на "овоча"; релігійні забобони; звільнять з університету; навіщо фахівці, коли є друзі чи батьки; нічим не допоможуть, а на гроші розкрутять; а що люди скажуть?

Учасники фокус-груп зазначили, що у вишах стали приділяти більше уваги підтримці ментального здоров'я. Діють психологічні служби. Проводиться психологічна просвіта та інформування: тематичні конференції, семінари, лекції, вебінари, курси тощо. Функціонують спеціалізовані сайти та телеграм-канали. За словами студентів, позитивний вплив мають курси "Самодопомога+"; підтримка у чаті "Helper Hub", "Teenergizer"; групові сесії та гуртки.

Водночас учасники наголосили на доцільності запровадження психологічних кабінетів на факультетах; штатних психологів; скринінгу стану ментального здоров'я учасників освітнього процесу для вчасного виявлення психічних порушень і перенаправлення до фахівців; курсу в освітніх програмах управління стресом "Самодопомога +"; сервісу доступних психологічних послуг; тренінгів за участю психологів-практиків; алгоритму дій підтримки ментального здоров'я; освітніх програм зі стресостійкості на базі провідного світового досвіду.

Дискусія і висновки

Більшість здобувачів вищої освіти із початком війни через перенесені психологічні травми мають відчутні ознаки погіршення психічного здоров'я. Проте лише незначна частина респондентів зверталася за психологічною допомогою, хоча потреба в ній значно зростає. Виявлено певні бар'єри та стереотипи, які перешкоджають зверненню студентів за психологічною підтримкою.

Результати дослідження свідчать, що потреба у психологічній допомозі зростає із тривалістю війни, а ігнорування ментальним здоров'ям у майбутньому може призвести до розвитку психічних розладів. Констатовано, що, хоч в українських вишах більше стали приділяти уваги підтримці

ментального здоров'я, цих заходів ще недостатньо і необхідно розширити та поліпшити сервіс доступних психологічних послуг.

Таким чином, набуває актуальності вдосконалення системи психологічного супроводу студентської молоді в українських вишах та необхідність розробки і впровадження інноваційної моделі захисту ментального здоров'я здобувачів вищої освіти у воєнний та повоєнний періоди.

Подяки, джерела фінансування. Дослідження виконано за допомогою грантової підтримки Національного фонду досліджень України у межах конкурсу "Наука для відбудови України у воєнний та повоєнний періоди" у рамках реалізації проекту "Інноваційна модель захисту ментального здоров'я студентської молоді у воєнний та повоєнний періоди" (реєстраційний номер 2022.01/0030).

Список використаних джерел

- Кічула, М., Заворотна, В., Трущенко, Л., & Вишньовський, А. (2024). Психічне здоров'я студентів в умовах воєнного стану як соціальна парадигма. *Вісник соціальної гігієни та організації охорони здоров'я України*, 4, 23–28. <https://doi.org/10.11603/1681-2786.2023.4.14422>
- Braun, V., & Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology*, 3(2), 77–101. <https://doi.org/10.1191/1478088706qp063oa>
- Hang, N.K., Trang, L.T., Huong, H.T.T., Huong, N.T., Khoi, N.D., Nguyen, M., & Le K. (2021, Sep. 16). *The Long-run Effects of War: A Literature Review*. <https://doi.org/10.31219/osf.io/kg39r>
- Hunt, J., & Eisenberg, D. (2010). Mental health problems and help-seeking behavior among college students. *The Journal of adolescent health: official publication of the Society for Adolescent Medicine*, 46(1), 3–10. <https://doi.org/10.1016/j.jadohealth.2009.08.008>
- Jawaid, A., Gomolka, M., & Timmer, A. (2022). Neuroscience of trauma and the Russian invasion of Ukraine. *Nature human behaviour*, 6(6), 748–749. <https://doi.org/10.1038/s41562-022-01344-4>
- Kurapov, A., Pavlenko, V., Drozdov, A., Bezliudna, V., Reznik, A., & Isralowitz, R. (2022). Toward an Understanding of the Russian-Ukrainian War Impact on University Students and Personnel. *Journal of Loss and Trauma*, 28(2), 167–174. <https://doi.org/10.1080/15325024.2022.2084838>
- Limone, P., Toto, G.A., & Messina, G. (2022, Nov. 25). Impact of the COVID-19 pandemic and the Russia-Ukraine war on stress and anxiety in students: A systematic review. *Front. Psychiatry*, 13, 1081013. <https://doi.org/10.3389/fpsy.2022.1081013>
- Martsenkovskiy, D., Shevlin, M., Ben-Ezra, M., Bondjers, K., Fox, R., Karatzias, T., Martsenkovska, I., Martsenkovsky, I., Pfeiffer, E., Sachser, C., Vallières, F., & Hyland, P. (2024, Mar. 27). Mental health in Ukraine in 2023. *Eur. Psychiatry*, 67(1), e27. <https://doi.org/10.1192/j.eurpsy.2024.12>
- Murthy, R.S., & Lakshminarayana, R. (2006, Feb.). Mental health consequences of war: a brief review of research findings. *World Psychiatry*, 5(1), 25–30. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1472271/>
- Pavlova, I., & Rogowska, A.M. (2023, Dec. 1). Exposure to war, war nightmares, insomnia, and war-related posttraumatic stress disorder: A network analysis among university students during the war in Ukraine. *Journal of Affective Disorders*, 342, 148–156. <https://doi.org/10.1016/j.jad.2023.09.003>
- Pei, J., Amanvermez, Y., Vigo, D., Puyat, J., Kessler, R.C., Mortier, P., Bruffaerts, R., Rankin, O., Chua, S.N., Martínez, V., Rapsey, C., Fodor, L.A., David, O.A., Garcia, C., & Cuijpers, P. (2024). Sociodemographic Correlates of Mental Health Treatment Seeking Among College Students: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Psychiatr. Serv.*, 75(6), 556–569. <https://doi.org/10.1176/appi.ps.20230414>
- Pinchuk, I., Solonskyi, A., Yachnik, Y., Kopchak, O., Klasa, K., Sobański, J.A., & Odintsova, T. (2024). Psychological well-being of Ukrainian students three months after the emerge of full-scale war. *Psychiatria Polska*, 58(1), 121–151. <https://doi.org/10.12740/PP/177073>
- Raccanello, D., Burro, R., Aristovnik, A., Ravšelj, D., Umek, L., Vicentini, G., Hall, R., Buizza, C., Buzdar, M.A., Chatterjee, S., Cucari, N., Dobrowolska, B., Ferreira-Oliveira, A.T., França, T., Ghilardi, A.,

Inasius, F., Kar, S.K., Karampelas, K., Kuzyshyn, A.,... Tomaževič, N. (2024, Apr. 12). Coping and emotions of global higher education students to the Ukraine war worldwide. *Sci. Rep.*, 14(1), 8561. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59009-3>

Sheather, J. (2022, Feb. 25). As Russian troops cross into Ukraine, we need to remind ourselves of the impact of war on health. *BMJ*, 376, o499. <https://doi.org/10.1136/bmj.o499>

References

Braun, V., & Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology*, 3(2), 77–101. <https://doi.org/10.1191/1478088706qp063oa>

Hang, N.K., Trang, L.T., Huong, H.T.T., Khoi, N.D., Nguyen, M., & Le K. (2021, Sep. 16). *The Long-run Effects of War: A Literature Review*. <https://doi.org/10.31219/osf.io/kg39r>

Hunt, J., & Eisenberg, D. (2010). Mental health problems and help-seeking behavior among college students. *The Journal of adolescent health: official publication of the Society for Adolescent Medicine*, 46(1), 3–10. <https://doi.org/10.1016/j.jadohealth.2009.08.008>

Jawaid, A., Gomolka, M., & Timmer, A. (2022). Neuroscience of trauma and the Russian invasion of Ukraine. *Nature human behaviour*, 6(6), 748–749. <https://doi.org/10.1038/s41562-022-01344-4>

Kichula, M.Y., Zavorotna, V.M., Trushchenkova, L.V., & Vyshniovsky, A.V. (2024). Mental health of students under martial law as a social paradigm. *Bulletin of Social Hygiene and Health Protection Organization of Ukraine*, 4, 23–28 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.11603/1681-2786.2023.4.14422>

Kurapov, A., Pavlenko, V., Drozdov, A., Bezliudna, V., Reznik, A., & Isralowitz, R. (2022). Toward an Understanding of the Russian-Ukrainian War Impact on University Students and Personnel. *Journal of Loss and Trauma*, 28(2), 167–174. <https://doi.org/10.1080/15325024.2022.2084838>

Limone, P., Toto, G.A., & Messina, G. (2022, Nov. 25). Impact of the COVID-19 pandemic and the Russia-Ukraine war on stress and anxiety in students: A systematic review. *Front. Psychiatry*, 13, 1081013. <https://doi.org/10.3389/fpsy.2022.1081013>

Martsenkovskiy, D., Shevlin, M., Ben-Ezra, M., Bondjers, K., Fox, R., Karatzias, T., Martsenkovska, I., Martsenkovsky, I., Pfeiffer, E., Sachser, C., Vallières, F., & Hyland, P. (2024, Mar. 27). Mental health in Ukraine in 2023. *Eur. Psychiatry*, 67(1), e27. <https://doi.org/10.1192/j.eurpsy.2024.12>

Murthy, R.S., & Lakshminarayana, R. (2006, Feb.). Mental health consequences of war: a brief review of research findings. *World Psychiatry*, 5(1), 25–30. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1472271/>

Pavlova, I., & Rogowska, A.M. (2023, Dec. 1). Exposure to war, war nightmares, insomnia, and war-related posttraumatic stress disorder: A network analysis among university students during the war in Ukraine. *Journal of Affective Disorders*, 342, 148–156. <https://doi.org/10.1016/j.jad.2023.09.003>

Pei, J., Amanvermez, Y., Vigo, D., Puyat, J., Kessler, R.C., Mortier, P., Bruffaerts, R., Rankin, O., Chua, S.N., Martínez, V., Rapsey, C., Fodor, L.A., David, O.A., Garcia, C., & Cuijpers, P. (2024). Sociodemographic Correlates of Mental Health Treatment Seeking Among College Students: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Psychiatr. Serv.*, 75(6), 556–569. <https://doi.org/10.1176/appi.ps.20230414>

Pinchuk, I., Solonskyi, A., Yachnik, Y., Kopchak, O., Klasa, K., Sobański, J.A., & Odintsova, T. (2024). Psychological well-being of Ukrainian students three months after the emerge of full-scale war. *Psychiatria Polska*, 58(1), 121–151. <https://doi.org/10.12740/PP/177073>

Raccanello, D., Burro, R., Aristovnik, A., Ravšelj, D., Umek, L., Vicentini, G., Hall, R., Buizza, C., Buzdar, M.A., Chatterjee, S., Cucari, N., Dobrowolska, B., Ferreira-Oliveira, A.T., França, T., Ghilardi, A., Inasius, F., Kar, S.K., Karampelas, K., Kuzyshyn, A.,... Tomaževič, N. (2024, Apr. 12). Coping and emotions of global higher education students to the Ukraine war worldwide. *Sci. Rep.*, 14(1), 8561. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59009-3>

Sheather, J. (2022, Feb. 25). As Russian troops cross into Ukraine, we need to remind ourselves of the impact of war on health. *BMJ*, 376, o499. <https://doi.org/10.1136/bmj.o499>

Отримано редакцією збірника / Received: 31.07.24

Прорецензовано / Revised: 15.08.24

Схвалено до друку / Accepted: 01.10.24

Nataliia STEPANOVA, PhD (Psychol.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0001-6055-8119
e-mail: nm_stepanova@ukr.net
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

MENTAL HEALTH OF STUDENTS: NEED FOR SUPPORT IN WARTIME

Introduction. *The war in Ukraine has become a significant additional stressor for most students. The purpose of this publication is to identify the need for support and protection of the mental health of higher education students during a military conflict, as well as to meet this need.*

Methods. *The readiness of participants in the educational process to seek help from mental health professionals was studied. Barriers and stigmas that prevent students from receiving timely qualified help, as well as the availability of psychological services at universities, were analyzed. The research was conducted using online surveys and focus groups. The online survey was conducted in two stages and covered 2,511 students from 17 universities in Ukraine.*

Results. *The study revealed signs of worsening in the mental health of the majority of respondents and a small number of requests for qualified help from them. It was found that most often students resolved their psychological problems on their own or sought support from family, friends, and close ones.*

Conclusions. *A focus group study involving 40 students and teachers allowed for a deeper understanding of the need for psychological support for the mental health of higher education students, identifying certain barriers and stereotypes that prevent them from seeking specialized help. The available options for receiving psychological help were identified, and suggestions for providing and improving psychological support services were studied. Implementing the results obtained into the practice of Ukrainian universities will improve the effective psychological support of students during their studies in wartime to maintain their mental health.*

Key words: *mental health, students, focus group, need for support, war.*

Автор Н. Степанова заявляє про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The author N. Stepanova declares no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

УДК 616.85+616.891:347.132.13:613.648

DOI: <https://doi.org/10.17721/3041-1491/2024.11-47>

Ірина ПЕРЧУК¹, канд. мед. наук, провід. наук. співроб.

ORCID ID: 0000-0002-2537-2113

e-mail: iperchuk76@gmail.com

Костянтин КУЦ¹, канд. мед. наук

ORCID ID: 0000-0003-1954-3075

e-mail: kvk0906@gmail.com

Георгій КРЕЙНІС¹, наук. співроб.

ORCID ID: 0000-0002-4470-1517

e-mail: gkreinis@gmail.com

Наталія ЗДАНЕВИЧ¹, канд. мед. наук

e-mail: n.zdanevych@kmu.edu.ua

Станіслав ЧУМАК², канд. мед. наук

ORCID ID: 0000-0001-7947-648X

e-mail: dr.stanislaw.chumak@gmail.com

¹Державна установа "Національний науковий центр
радіаційної медицини, гематології та онкології

Національної академії медичних наук України", Київ, Україна

²Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

ДОСВІД ВИВЧЕННЯ НЕЙРОПСИХІАТРИЧНИХ ЗМІН У ОСІБ, ЩО ПОСТРАЖДАЛИ ВНАСЛІДОК АВАРІЇ НА ЧОРНОБИЛЬСЬКІЙ АЕС

Вступ. Аварія на Чорнобильській АЕС, 26 квітня 1986 р. визнана безпрецедентною, великомасштабною катастрофою ХХ сторіччя. Однією з її особливостей є поєднання впливу іонізуючого опромінення й інших чинників нерадіаційного походження, зокрема таких, як: важкі метали, психологічний і соціальний стрес високої інтенсивності на стан здоров'я постраждалих. На основі досліджень, проведених у відділі радіаційної психоневрології Інституту клінічної радіології Державної установи "Національний науковий центр радіаційної медицини, гематології та онкології Національної академії медичних наук України" (далі – ІКР ННЦРМГО), встановлено декілька механізмів радіоцеребральних ефектів. В учасників ліквідації наслідків аварії на Чорнобильській АЕС (далі – УЛНА на ЧАЕС) виявлено ознаки органічного ураження головного мозку з переважним залученням кортико-лімбічної системи лівої (домінантної) півкулі з тенденцією до його дифузного поширення. Виражені порушення інформаційних і когнітивних процесів головного мозку на тлі функціональної гіпофронтальності обумовлюють необхідність подальших досліджень з метою своєчасного виявлення ознак дезадаптивного нейрокогнітивного дефіциту (деменції).

Висновки. Таким чином, довгострокові радіаційно- і нерадіаційно-асоційовані нейропсихофізіологічні та нейрокогнітивні розлади, що виникли внаслідок Чорнобильської катастрофи та інших різноманітних психотравмуючих ситуацій, є значною науково-практичною та медико-соціальною проблемою, яка потребує подальших національних і міжнародних досліджень з адекватним дозиметричним супроводом.

Ключові слова: УЛНА на ЧАЕС, іонізуюче опромінення, радіоцеребральні ефекти, нейропсихіатричні ефекти.

© Перчук Ірина, Куц Костянтин, Крейніс Георгій,
Зданевич Наталія, Чумак Станіслав, 2024

Вступ

Важливо, що внаслідок Чорнобильської катастрофи та постійно існуючого ризику виникнення радіаційних надзвичайних ситуацій світовий інтерес до радіоцеребральних ефектів та проблеми радіочутливості головного мозку суттєво зріс. Порушення психічного здоров'я постраждалих унаслідок аварії на ЧАЕС і, зокрема, УЛНА на ЧАЕС, уже давно є міжнародно визнаною пріоритетною медико-соціальною проблемою Чорнобильської катастрофи. Причини появи її нейропсихіатричних наслідків залишаються вкрай дискусійними. Ключовою патологією є: розлади, пов'язані зі стресом; ефекти на головний мозок, що розвивається; органічні психічні розлади і самогубства, а також серцево-судинні захворювання (у т. ч., цереброваскулярні) в УЛНА на ЧАЕС (Базика, 2021, с. 142).

Уже тривалий період відділ радіаційної психоневрології ІКР ННЦРМГО під керівництвом д-ра мед. наук, професора К. М. Логановського (1966–2022) займається вивченням стану психіки, нервової системи та їх функціонально-структурного базису (зокрема нейрофізіологічних та клініко-радіологічних досліджень) у осіб, що зазнали радіаційного впливу внаслідок Чорнобильської катастрофи та за інших сценаріїв опромінення порівняно з ураженням головного мозку в неопромінених та віковою нормою.

Метою нашої аналітичної роботи було показати актуальність накопичених знань стосовно негативних нейропсихіатричних ефектів впливу іонізуючого опромінення та важливість продовження досліджень у цьому напрямі, особливо враховуючи воєнний стан у країні та ситуації, що склалася і можуть скластися навколо атомних електростанцій.

У нашому аналітичному огляді були використані ретроспективні результати досліджень відділу радіаційної психоневрології, тобто результати досліджень УЛНА на ЧАЕС та евакуйованих з використанням квантифікованих нейропсихіатричних, нейрофізіологічних (спонтанна і викликана церебральна біоелектрична активність на сенсорні та когнітивні стимули), нейропсихологічних та лабораторних методів дослідження.

Значущі результати вивчення нейропсихіатричних наслідків опромінення були після атомних бомбардувань Хіросіми та Нагасакі. Визнано, що атомні бомбардування суттєво вплинули на стан психічного здоров'я постраждалих. Причому серед потерпілих, які мали симптоми гострого радіаційного ураження, частота неврозоподібних симптомів була вищою порівняно з тими, котрі не мали такого ураження (Honda et al., 2002). Поширеність тривоги і симптомів соматизації серед тих, хто вижив після атомних бомбардувань, перевищувала за таку в популяції навіть через 17–20 років після бомбардування, що свідчить про довгострокову природу психіатричних ефектів. Психіатричні наслідки були незалежними від соматичних захворювань (Yamada, & Izumi, 2002).

Після аварії на АЕС Фукусіма-1 при обстеженні осіб, які проживали біля цієї станції, також були виявлені проблеми психічного здоров'я. В основному

це були посттравматичні реакції, психологічний вплив на членів родини, депресія та самогубство, а також радіаційне занепокоєння та занепокоєння своїм здоров'ям у майбутньому. Вважається, що багато із цих проблем психічного здоров'я дуже специфічні для ядерної кризи (Maeda, & Oe, 2017).

В огляді на основі проспективних когортних досліджень та досліджень "до і після", які охоплювали більше двох часових точок, були виявлені довгострокові порушення психічного здоров'я після аварій на Три Майленд Айлэнд, Чорнобильській АЕС та Фукусимі. А основними факторами ризику цих порушень визнано рівень радіаційного опромінення, радіаційне занепокоєння та занепокоєння своїм здоров'ям (Oe et al., 2021).

В УЛНА на ЧАЕС та евакуйованих осіб встановлено значно підвищені рівні психічних і поведінкових розладів, судинної деменції, зловживання алкоголем, депресії та "пострадіаційні" посттравматичні стресові розлади (далі – ПТСР). Синдром залежності від алкоголю і зловживання алкоголем в УЛНА розвиваються вторинно внаслідок психічних розладів, що виникли раніше (Логановський, 2002). Визначено дозозалежні церебральні порушення, які настають після впливу зовнішнього опромінення в дозах $> 0,3$ Зв та біологічні маркери радіаційного ураження головного мозку при дозах > 1 Зв. Виявлено радіаційно-асоційовану кортиколімбічну дисфункцію лівої домінантної півкулі. Потенційні радіоіндуковані нейропсихіатричні ефекти можуть сприяти прискоренню старіння та нейродегенерацію (Loganovsky, & Yuryev, 2001).

Висловлено припущення, що синдром хронічної втоми є характерним наслідком впливу малих доз радіації та стресу. Проспективне дослідження персоналу, що працював над перетворенням об'єкта "Укриття" на ЧАЕС на екологічно безпечну систему, показало, що вплив малих доз ($0\text{--}56,7$ мЗв, $M \pm SD: (19,9 \pm 13,0)$ мЗв) і промислових факторів ризику може призвести до виникнення когнітивного синдрому хронічної втоми. Встановлено, що особи, які раніше зазнали впливу іонізуючого випромінювання, але залишились здоровими, є більш стійкими до подальшого опромінення (Перчук, 2011).

Виявлено, що вплив іонізуючого випромінювання і психологічного стресу внаслідок радіаційної надзвичайної ситуації у віддалений період після Чорнобильської катастрофи в УЛНА та евакуйованих із Чорнобильської зони відчуження викликав характерні ПТСР, що коморбідні з депресією, нейрокогнітивним дефіцитом і цереброваскулярною патологією. Нейрокогнітивний дефіцит у постраждалих унаслідок аварії на ЧАЕС з ПТСР є вищим, ніж у ветеранів війни в Афганістані. "Пострадіаційний" ПТСР характеризується проєкцією страху і невпевненості в майбутньому ("антиципаторний стрес") стосовно раку, вроджених вад розвитку у нащадків тощо. В УЛНА з ПТСР підвищені ризики інсульту та атеросклерозу, виявлені також дисфункція неокортексу, гіпокампу та серединних структур головного мозку (Зданевич, 2012).

Встановлено, що дефіцит загального IQ за рахунок зниження вербального IQ можна розглядати як нейропсихологічні маркери когнітивних порушень в

УЛНА на ЧАЕС із хронічною цереброваскулярною патологією, які відбивають латералізацію ураження до лівої (домінантної) гемісфери головного мозку. Психофізіологічними маркерами когнітивних порушень в УЛНА на ЧАЕС із хронічною цереброваскулярною патологією є зниження спектральної потужності тета-діапазону у лівій лобно-скроневій ділянці та збільшення латентного періоду і зменшення амплітуди когнітивних слухових викликаних потенціалів Р300 у зоні Верніке (Куц, 2018).

Роль іонізуючого випромінювання в патогенезі афективних розладів у опромінених осіб зі сприятливими психобіологічними рисами була підтверджена нашим дослідженням, яке показало зв'язок генотипів за поліморфізмами 5HTTLPR і rs25531 гена SLC6A4 з афективними і когнітивними порушеннями у УЛНА, що свідчить про наявність нейропсихобіологічних особливостей цих порушень, пов'язаних з іонізуючим випромінюванням залежно від певних генних поліморфізмів. Афективні розлади (депресія) і нейрокогнітивний дефіцит виявились виразнішими за більш високих доз опромінювання (> 50 мЗв). Носії генотипів середнього і низького рівня (LA/S, LA/LG, LG/LG, LG/S, S/S) гена транспортера серотоніну SLC6A4 мають більше депресивних розладів, особливо тяжких при тенденції до зростання частоти когнітивних і стресових розладів (Loganovsky et al., 2018).

Після проведених ретроспективно-проспективних когортних клініко-епідеміологічних досліджень УЛНА з наявністю у них доз внутрішнього опромінювання виявилося, що при зовнішньому та внутрішньому контролі УЛНА мають ексцес когнітивних, афективних та пов'язаних зі стресом розладів. Ризик виникнення захворювань зростає зі збільшенням дози опромінювання. Радіаційні ризики виявлено для органічних психозів, неспсихотичних органічних уражень головного мозку, гострої та хронічної цереброваскулярної патології (Loganovsky et al., 2020).

Нейроофтальмометричні дослідження у віддалений період опромінювання у дорослому віці верифікували в УЛНА наявність психопатологічних проявів та нейрокогнітивної дисфункції. Нейрофізіологічним базисом радіаційно-асоційованої цереброофтальмологічної патології є ураження кортико-лімбічної системи головного мозку та центральних механізмів аферентації на вищих рівнях процесів обробки візуальної інформації у вторинних та третинних кіркових зонах зорового аналізатора. Уперше визначено сировотковий рівень BDNF у опромінених людей із його зниженням пропорційно до віку та збільшенню нейрокогнітивного дефіциту як біомаркера церебральних уражень (Логановський, 2021).

Останнім часом виникла нагальна необхідність оцінювання потенційних радіоцеребральних ефектів через призму трансформуючого впливу екстремального емоційного стресу та інших несприятливих чинників, які з'явились унаслідок повномасштабного вторгнення рф на територію України, і введення в Україні воєнного стану з 24 лютого 2022 року, що наразі триває. Військові дії, які тривають на території нашої держави вже понад два роки,

значно підвищили ризики виникнення радіаційних надзвичайних ситуацій: аварій на діючих ядерних реакторах (Запорізька АЕС) та великих ядерних об'єктах (об'єкт "Укриття"), ядерного тероризму із використанням диспергуючого радіологічного пристрою ("брудної бомби"), а також застосування тактичної і стратегічної ядерної зброї.

У працівників ДСП ЧАЕС, які перебували на робочих місцях в умовах окупації ЧАЕС російськими військовими з 24.02 по 31.03.2022 року включно, виявлені експеси, пов'язані зі стресом і соматоформними розладами, переважно внаслідок ПТСР. У працівників ДСП ЧАЕС уперше виявлені негативні кореляційно-регресійні залежності між показниками фракційної анізотропії у верхньому довгому повздовжньому пучку (*fasciculus longitudinalis superior*) правої церебральної гемісфери, цингулярному пучку (*cingulum*) лівої гемісфери та балами за шкалою PCL-5. Таке зменшення щільності білої речовини головного мозку в церебральних провідних шляхах може свідчити про негативний синергічний вплив тривалого стресу і малих доз ІВ не лише на клінічному, психофізіологічному, але й на нейроанатомічному рівнях. Іншими словами, це може свідчити про безпосередній вплив на структуру тканини головного мозку людини, а отже, у подальшому це може призвести до розвитку стійких когнітивних порушень. Виявлені зміни потребують подальшого спостереження й уточнення з метою з'ясування їх динаміки та ступеня зворотності (Куц та ін., 2023).

Дискусія і висновки

Таким чином, результати довготривалого вивчення нейропсихіатричних змін у осіб, що постраждали внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС, представлені в цій аналітичній роботі, свідчать: *по-перше*, про актуальність і перспективність цих досліджень, особливо в умовах подій, які відбуваються сьогодні в нашій країні; *по-друге*, дискусійність причин виникнення нейропсихіатричних змін є підтвердженням необхідності і важливості подальшого спостереження та розробки й впровадження загальнонаціональної системи охорони психічного здоров'я постраждалих унаслідок Чорнобильської катастрофи та можливих радіаційних аварій і терористичних атаках із застосуванням радіологічного диспергуючого пристрою ("брудної бомби"). Тобто психологічний стрес високої інтенсивності в поєднанні з особливостями сприйняття ризику радіаційних надзвичайних ситуацій призводять до соціальних змін, порушень психічного і фізичного здоров'я, психосоматичних розладів, онкологічних та неонкологічних захворювань. Вищезазначене обумовлює необхідність медичного моніторингу, розробки та впровадження інноваційних підходів з мінімізації наслідків впливу психотравмуючих ситуацій, пов'язаних із надзвичайними подіями радіаційного та нерадіаційного характеру.

Внесок авторів: Ірина Перчук – концептуалізація, написання – оригінальна чернетка; Костянтин Куц – валідація даних, написання – оригінальна чернетка; Георгій Крейніс – програмне забезпечення, формальний аналіз; Наталія Зданевич – написання – перегляд і редагування; Станіслав Чумак – написання – перегляд і редагування.

Список використаних джерел

Бази́ка, Д.А. (Ред.). (2021). *Тридцять п'ять років Чорнобильської катастрофи: радіологічні та медичні наслідки, стратегії захисту та відродження*. Державна установа "Національний науковий центр радіаційної медицини Національної академії медичних наук України". https://nrcrm.gov.ua/downloads/2021/national_report_2021.pdf

Зданевич, Н.А. (2012). *Когнітивні і нейрофункціональні особливості посттравматичних стресових розладів у постраждалих у віддалений період Чорнобильської катастрофи* [Дис. канд. мед. наук]. Державна установа "Національний науковий центр радіаційної медицини Національної академії медичних наук України".

Куц, К.В. (2018). *Нейрокогнітивний дефіцит при хронічній цереброваскулярній патології в осіб, які зазнали дії іонізуючого випромінювання в діапазоні малих доз внаслідок чорнобильської катастрофи* [Дис. канд. мед. наук]. Державна установа "Національний науковий центр радіаційної медицини Національної академії медичних наук України".

Куц, К.В., Логановська, Т.К., Крейніс, Г.Ю., Перчук, І.В., Антипчук, К.Ю., Сушко, В.О., & Дикан, І.М. (2023). Нейрофізіологічний базис комбінованих ефектів гострого стресу та малих доз іонізуючого випромінювання на головний мозок людини. *Проблеми радіаційної медицини та радіобіології*, 28, 348–373. <https://doi.org/10.33145/2304-8336-2023-28-348-373>

Логановський, К.М. (2002). *Психічні розлади при дії іонізуючого випромінювання внаслідок Чорнобильської катастрофи: нейрофізіологічні механізми, уніфікована клінічна діагностика, лікування* [Дис. д-ра мед. наук]. Державна установа "Національний науковий центр радіаційної медицини Національної академії медичних наук України".

Логановський, К.Н. (2021). *Визначення нейрофізіологічного базису цереброофтальмологічних ефектів малих доз опромінення*. Заключний звіт про НДР, № держреєстрації 0119U100563. Державна установа "Національний науковий центр радіаційної медицини Національної академії медичних наук України".

Перчук, І.В. (2011). Клініко-психофізіологічний стан персоналу, який виконував роботи з перетворення об'єкту "Укриття" на екологічно безпечну систему [Дис. канд. мед. наук]. Державна установа "Національний науковий центр радіаційної медицини Національної академії медичних наук України".

Honda, S., Shibata, Y., Mine, M., Imamura, Y., Tagawa, M., Nakane, Y., & Tomonaga, M. (2002). Mental health conditions among atomic bomb survivors in Nagasaki. *Psychiatry and Clinical Neurosciences*, 56(5), 575–583. <https://doi.org/10.1046/j.1440-1819.2002.01057.x>

Loganovsky, K.N., & Yuryev, K.L. (2001). EEG patterns in persons exposed to ionizing radiation as a result of the Chernobyl accident: Part 1: Conventional EEG analysis. *J. Neuropsychiatry Clin. Neurosci*, 13(4), 441–458. <https://doi.org/10.1176/jnp.13.4.441>

Loganovsky, K.N., Bomko, M.O., Abramenko, I.V., Kuts, K.V., Belous, N.I., Masiuk, S.V., Gresko, M.V., Loganovska, T.K., Antypchuk, K.Yu., Perchuk, I.V., Kreinis, G.Yu., & Chumak, S.A. (2018). Neuropsychobiological mechanisms of affective and cognitive disorders in the Chornobyl clean-up workers taking into account the specific genopolymorphisms. *Probl. Radiac. Med. and Radiobiol*, 23, 373–409. <https://doi.org/10.33145/2304-8336-2018-23-373-409>

Loganovsky, K.N., Masiuk, S.V., Buzunov, V.A., Marazziti, D., & Voychulene, Yu.S. (2020). Radiation risk analysis of neuropsychiatric disorders in Ukrainian Chornobyl catastrophe liquidators. *Frontiers in Psychiatry*, 11, 553420. <https://doi.org/10.3389/fpsy.2020.553420>

Maeda, M., & Oe, M. (2017). Mental health consequences and social issues after the Fukushima disaster. *Asia Pac. J. Public Health*, 29(2), 36S–46S. <https://doi.org/10.1177/1010539516689695>

Oe, M., Takebayashi, Y., Sato, H., & Maeda, M. (2021). Mental health consequences of the Three Mile Island, Chernobyl, and Fukushima nuclear disasters: a scoping review. *Int. J. Environ. Res. and Public Health*, 18(14), 7478. <https://doi.org/10.3390/ijerph18147478>

Yamada M., & Izumi S. (2002). Psychiatric sequelae in atomic bomb survivors in Hiroshima and Nagasaki two decades after the explosions. *Soc. Psychiatry Psychiatr. Epidemiol.*, 37(9), 409–415. <https://doi.org/10.1007/s00127-002-0572-5>

References

- Basyka, D.A. (Ed.). (2021). *Thirty-five years of the Chernobyl disaster: radiological and medical consequences, strategies protection and revival. National report of Ukraine*. State Institution "National Research Center for Radiation Medicine", National Academy of Medical Sciences of Ukraine [in Ukrainian]. https://nrcrm.gov.ua/downloads/2021/national_report_2021.pdf
- Honda, S., Shibata, Y., Mine, M., Imamura, Y., Tagawa, M., Nakane, Y., & Tomonaga, M. (2002). Mental health conditions among atomic bomb survivors in Nagasaki. *Psychiatry and Clinical Neurosciences*, 56(5), 575–583. <https://doi.org/10.1046/j.1440-1819.2002.01057.x>
- Kuts, K.V. (2018). *Neurocognitive deficit in chronic cerebrovascular pathology in the individuals exposed to ionizing radiation in low doses range due to the Chernobyl accident* [Diss. PhD Med. Sciences]. State Institution "National Research Center for Radiation Medicine", National Academy of Medical Sciences of Ukraine [in Ukrainian].
- Kuts, K.V., Loganovskaya, T.K., Kreinis, H.Iu., Perchuk, I.V., Antypchuk, K.Iu., Sushko, V.O., & Dykan, I.M. (2023). *Neurophysiological basis of the combined effects of acute stress and low doses of ionising radiation on the human brain*. *Problemy radiatsiinoi medytsyny ta radiobiologii Problems of Radiation Medicine and Radiobiology*, 28, 348–373 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.33145/2304-8336-2023-28-348-373>
- Loganovsky, K.M. (2002). *Mental disorders under the influence of ionising radiation as a result of the Chernobyl disaster: neurophysiological mechanisms, unified clinical diagnosis, treatment* [Diss. DSc Med. Sciences]. State Institution "National Research Center for Radiation Medicine", National Academy of Medical Sciences of Ukraine [in Ukrainian].
- Loganovsky, K.N. (2021). *Determination of the neurophysiological basis of cerebro-ophthalmological effects of low doses of radiation*. Final report on the research work, state registration number 0119U100563. State Institution "National Research Center for Radiation Medicine", National Academy of Medical Sciences of Ukraine [in Ukrainian].
- Loganovsky, K.N., & Yuryev, K.L. (2001). EEG patterns in persons exposed to ionizing radiation as a result of the Chernobyl accident: Part 1: Conventional EEG analysis. *J. Neuropsychiatry Clin. Neurosci*, 13(4), 441–458. <https://doi.org/10.1176/jnp.13.4.441>
- Loganovsky, K.N., Bomko, M.O., Abramenko, I.V., Kuts, K.V., Belous, N.I., Masiuk, S.V., Gresko, M.V., Loganovska, T.K., Antypchuk, K.Yu., Perchuk, I.V., Kreinis, G.Yu., & Chumak, S.A. (2018). Neuropsychobiological mechanisms of affective and cognitive disorders in the Chornobyl clean-up workers taking into account the specific genopolymorphisms. *Probl. Radiac. Med. and Radiobiol*, 23, 373–409. <https://doi.org/10.33145/2304-8336-2018-23-373-409>
- Loganovsky, K.N., Masiuk, S.V., Buzunov, V.A., Marazziti, D., & Voychulene, Yu.S. (2020). Radiation risk analysis of neuropsychiatric disorders in Ukrainian Chornobyl catastrophe liquidators. *Frontiers in Psychiatry*, 11, 553420. <https://doi.org/10.3389/fpsy.2020.553420>
- Perchuk, I.V. (2011). *Clinical and psychophysiological state of the personnel who performed work on the Shelter transformation into an environmentally safe system*. [Diss. PhD Med. Sciences]. State Institution "National Research Center for Radiation Medicine", National Academy of Medical Sciences of Ukraine [in Ukrainian].
- Zdanevych, N.A. (2012). *Cognitive and neurofunctional features of post-traumatic stress disorders in victims of the Chernobyl disaster in the remote period* [Diss. PhD Med. Sciences]. State Institution "National Research Center for Radiation Medicine", National Academy of Medical Sciences of Ukraine [in Ukrainian].

Отримано редакцією збірника / Received: 01.08.24

Прорецензовано / Revised: 22.08.24

Схвалено до друку / Accepted: 01.10.24

Iryna PERCHUK¹, PhD (Med.), Leading Researcher

ORCID ID: 0000-0002-2537-2113

e-mail: iperchuk76@gmail.com

Kostiantyn KUTS¹, PhD (Med.)

ORCID ID: 0000-0003-1954-3075

e-mail: kvk0906@gmail.com

Heorhii KREINIS¹, Researcher

ORCID ID: 0000-0002-4470-1517

e-mail: gkreinis@gmail.com

Nataliia ZDANEVYCH¹, PhD (Med.)

e-mail: n.zdanevych@kmu.edu.ua

Stanislav CHUMAK², PhD (Med.)

ORCID ID: 0000-0001-7947-648X

e-mail: dr.stanislav.chumak@gmail.com

¹State Institution "National Research Center for Radiation Medicine, Hematology and Oncology of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine", Kyiv, Ukraine

²Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

EXPERIENCE IN THE STUDY OF NEUROPSYCHIATRIC CHANGES IN PEOPLE AFFECTED BY THE CHERNOBYL ACCIDENT

Introduction. *The Chernobyl accident of April 26, 1986, is recognized as an unprecedented, large-scale catastrophe of the twentieth century, representing the combined effects of ionizing radiation and other factors, such as heavy metals; and enormous psychological and social stress on the health of the victims. The purpose of this paper is to reflect the accumulation of knowledge on the neuropsychiatric effects of ionizing radiation exposure. Based on the studies conducted at the Department of Radiation Psychoneurology of the ICR NRCRMO, several mechanisms of radiocerebral effects have been identified. The signs of organic brain damage with predominant involvement of the cortico-limbic system of the left (dominant) hemisphere with a tendency to its diffuse spread, severe disorders of information and cognitive processes of the brain against the background of functional hypofrontality were detected in the Chernobyl NPP survivors, which necessitates further research to detect signs of maladaptive neurocognitive deficit (dementia) in a timely manner.*

Conclusions. *Thus, long-term radiation- and non-radiation-associated neuropsychophysiological and neurocognitive disorders due to the Chernobyl disaster and various psychotraumatic situations are a significant scientific, practical, medical and social problem that requires further national and international research with adequate dosimetric support.*

Keywords: *Chernobyl accident, ionizing radiation, radiocerebral effects, neuropsychiatric effects.*

Автори І. Перчук, К. Куц, Г. Крейніс, Н. Зданевич та С. Чумак заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors I. Perchuk, K. Kuts, H. Kreinis, N. Zdanevych and S. Chumak declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

МЕНТАЛЬНЕ ЗДОРОВ'Я ТА ПРОДУКТИВНІСТЬ АКАДЕМІЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ УКРАЇНСЬКИХ СТУДЕНТІВ У ПЕРІОД ВІЙНИ

Вступ. Публікація присвячена аналізу ментального здоров'я студентів закладів вищої освіти під час війни та його впливу на продуктивність академічної діяльності студентської молоді в Україні.

Методи. Розглянуто сутність і характеристики ментального здоров'я студентів, а також специфіку змін їхнього психоемоційного стану у період навчання в закладах вищої освіти під впливом специфічних стресових факторів, які зумовлені воєнним станом та постійними ризиками ракетних ударів по мирних містах та цивільній інфраструктурі.

Результати. Досліджено основні види психічних розладів та поширеність симптомів депресії, тривожного розладу, посттравматичного стресового розладу серед українських студентів під час війни. Було виявлено надзвичайно високий відсоток респондентів із симптомами депресії (85 %) та тривожного розладу (66 %). На основі статистичного аналізу даних опитування студентів вітчизняних університетів обґрунтовано негативний вплив проблем у сфері ментального здоров'я на продуктивність їхньої академічної діяльності.

Висновки. Доведено, що виникнення психічних розладів і порушень серед українських студентів під час війни перешкоджає здобуттю знань та розвитку компетенцій, необхідних для майбутньої професійної діяльності, що є однією із загроз успішному повоєнному відновленню економіки України й вимагає адекватних та своєчасних заходів у галузі публічної політики охорони ментального здоров'я студентської молоді.

Ключові слова: ментальне здоров'я, війна, продуктивність, академічна діяльність, психічні розлади.

Вступ

Повномасштабне вторгнення росії в Україну зумовило масштабну гуманітарну катастрофу, загостривши ряд проблем, які існували й раніше, але стали особливо актуальними після початку війни. Однією з таких проблем є зростання кількості студентів із психічними розладами та порушеннями, що не лише зберігатиме актуальність під час воєнного стану, але й матиме важливий вплив на українське суспільство в період післявоєнної відбудови. Обмежений доступ до послуг із психосоціальної підтримки, руйнування спеціалізованих закладів охорони здоров'я, міграція частини медичних працівників за кордон жодним чином не сприяють ранньому виявленню, ефективній профілактиці та лікуванню психічних розладів серед студентів, які здебільшого навчаються онлайн і не покидали своїх домівок під час війни. Від початку війни

© Вірченко Володимир, 2024

3798 українських навчальних закладів постраждали від атак агресора, 365 із них були зруйновані (Ministry of Education and Science of Ukraine, 2023). У Харківській області та п'яти інших областях України від 50 % до 90 % будівель закладів вищої освіти були частково пошкоджені або навіть повністю зруйновані (Тимчук, & Панасюк, 2022).

За даними Комітету з питань освіти, науки та інновацій Верховної Ради України, майже 70 % українських університетів підтвердили, що їхні студенти пережили внутрішнє переміщення або евакуацію до інших країн. За оцінками Комітету, 130–150 тис. українських студентів перебувають за кордоном, а з початку повномасштабної війни майже 24 тис. студентів не відновили навчання з різних причин (Ukraine Education Cluster, 2022).

Незважаючи на свою наукову та суспільну значимість, вплив війни на психічне здоров'я студентів та їхню навчальну діяльність залишається недостатньо дослідженою проблемою. Більшість досліджень стосується психічного здоров'я загального населення в країнах, де відбувалися військові конфлікти – зокрема, у Сирії, Іраку, Руанді та балканських країнах (Rugema et al., 2015). Психічні розлади та порушення серед студентської молоді, яка постраждала від збройних конфліктів, розглядаються в нечисленних дослідженнях (Yousef et al., 2021). В Україні наявні окремі дослідження щодо умов навчання студентів на окупованих територіях (Назаренко, Когут, & Жерьобкіна, 2022), виявлення впливу війни на психоемоційний стан українських студентів (Kurarov et al., 2022, pp. 170–171), проте всі вони зазвичай мають достатньо невелику вибірку або охоплюють короткий часовий інтервал. Як свідчить практика, питання психічного здоров'я молоді іноді аналізуються не самостійно, а в межах дослідження особливостей розвитку системи вищої освіти в умовах війни. Зокрема, вітчизняний аналітичний центр через опитування студентів виявив, що понад 80 % респондентів мають проблеми з депресією, тривогою та розладами сну (Ніколаєв, Рій, & Шемелинець, 2023, с. 34–35).

Метою нашого дослідження є аналіз взаємозв'язку між ментальним здоров'ям та продуктивністю академічної діяльності студентів в Україні під час війни.

Методи

Дизайн дослідження підпорядковується принципу наукової індукції, тобто передбачає формування нового знання щодо зв'язків між явищами та процесами на основі узагальнення емпіричних даних. Основними завданнями дослідження, які слугують досягненню визначеної вище мети, є: збір та обробка даних опитування студентів українських університетів; аналіз поширеності симптомів психічних розладів серед студентів; оцінювання впливу проблем у галузі ментального здоров'я на продуктивність академічної діяльності студентів. Учасниками опитування стали студенти українських університетів, включаючи студентів бакалаврату та магістратури, з різних регіонів України. Відповіді респондентів були зібрані за допомогою спеціально розробленої онлайн-анкети з використанням ліцензованого програмного

забезпечення для проведення онлайн-опитувань Qualtrics. Посилання на анкету було поширено серед різних університетів та лідерів студентського самоврядування з різних регіонів України. Збір даних проводився протягом вересня – листопада 2023 року.

До участі в опитуванні запрошувалися студенти віком від 18 років і старше. Усім учасникам було повідомлено, що вони можуть у будь-який момент відкликати свої дані, а отримана інформація буде анонімною та конфіденційною. Кожен з учасників опитування підписав інформовану згоду, поставивши відмітку біля відповідного застереження на початку онлайн-анкети. Під час опитування було зібрано соціально-демографічні дані, а також інформацію щодо симптомів психічних проблем та продуктивності академічної діяльності студентів під час війни. Скринінг симптомів психічних розладів здійснювався з використанням спеціальних стандартизованих шкал (PC-PTSD-5 для ПТСР, PHQ-9 для депресії, GAD-7 для тривожного розладу). За результатами аналізу даних опитування, було встановлено, що відповіді на усі питання щодо симптомів психічних проблем та продуктивності академічної діяльності надали 1398 студентів, у той час як загальна кількість респондентів становила 2364 студенти з різних регіонів України, за винятком тимчасово окупованих територій.

В опитувальнику було використано шість запитань щодо впливу проблем ментального здоров'я на продуктивність академічної діяльності студентів, а саме:

1. Чи навчаєтесь ви зараз в університеті?
2. Скільки годин за останні 14 днів ви пропустили через проблеми з психічним здоров'ям?
3. Скільки годин за останні 14 днів ви пропустили з будь-якої іншої причини, наприклад, через відпустку, канікули, участь у цьому дослідженні?
4. Скільки годин протягом останніх 14 днів ви фактично навчалися?
5. Протягом останніх 14 днів, наскільки ваші проблеми із психічним здоров'ям вплинули на вашу продуктивність під час навчання? (Використовуйте число від 1 до 10. Якщо ваші проблеми із психічним здоров'ям вплинули на навчання лише незначною мірою, оберіть низьке число, і навпаки).
6. Протягом останніх 14 днів, наскільки ваші проблеми із психічним здоров'ям вплинули на вашу здатність займатися звичайними повсякденними справами, окрім навчання? (використовуйте число від 1 до 10. Якщо проблеми із психічним здоров'ям лише незначною мірою вплинули на навчання, оберіть низьке число, і навпаки).

Збір даних було виконано за допомогою програмного забезпечення Qualtrics, потім вони оброблялися в ліцензійному Microsoft Excel 2019. Надійність опитувальника була перевірена за допомогою програмного забезпечення JASP 0.17.3.

Результати

Ментальне здоров'я є доволі складним і багатоаспектним поняттям, що комплексно впливає на повсякденну та професійну діяльність людини. За

визначенням Всесвітньої організації охорони здоров'я, ментальне здоров'я не лише характеризується відсутністю психічних розладів, а й передбачає особливий стан психічного благополуччя, за якого людина здатна повною мірою використовувати свої знання та здібності, справлятися зі звичайними життєвими стресами, продуктивно працювати та робити внесок у життя своєї сім'ї та громади (World Health Organization, 2013). Застосовуючи це поняття до студентів та їхньої академічної діяльності, слід зазначити, що проблеми у сфері ментального здоров'я не дозволяють студентам демонструвати продуктивність, підвищувати свою працездатність, використовувати всі набуті компетенції та успішно досягати поставлених навчальних цілей. У свою чергу, це негативно позначається на формуванні людського капіталу, що починає набувати особливо загрозливого вигляду в умовах повномасштабної війни в Україні.

Засновник теорії людського капіталу, лауреат Нобелівської премії Теодор Вільям Шульц розглядав його як сукупність знань, здібностей і кваліфікації працівника, що виконують функцію засобів виробництва та предметів тривалого користування (Schultz, 1960, pp. 571–572). Інший нобелівський лауреат – Гері Стенлі Беккер визначав людський капітал як втілені в працівникові освітній рівень, кваліфікацію та фізичні здібності, що є результатом інвестицій у людину. Він обґрунтовував необхідність та високу прибутковість інвестицій у людський капітал, що включають витрати на освіту, практичну підготовку, охорону здоров'я, пошук інформації (Becker, 1962). Порівняно з промисловим капіталом людський капітал у процесі використання не зношується, а навпаки, сприяє розширеному відтворенню інтелектуального потенціалу підприємств та організацій.

Таким чином, зниження продуктивності академічної діяльності студентів через проблеми в галузі ментального здоров'я надзвичайно негативно впливає на розвиток людського капіталу, адже створює бар'єри на шляху засвоєння знань та формування необхідних компетентностей студентською молоддю. Фахова освіта відіграє визначальну роль у набутті студентами спеціальних знань і навичок, що формують трудовий потенціал підприємства, тобто наявні і передбачувані в майбутньому трудові можливості його персоналу. У свою чергу, трудовий потенціал забезпечують такі якості працівника, як ініціатива, творчість, самостійність і логічність мислення, здатність до колективної праці і співробітництва, діловитість, схильність до підвищення рівня знань і кваліфікації, професійні знання. При цьому, здібності та знання перетворюються на капітал лише тоді, коли починають використовуватися як фактор виробництва і приносять дохід.

На наш погляд, прямий зв'язок між продуктивністю академічної діяльності студентів та відтворенням людського капіталу демонструє, що виникнення та розвиток психічних розладів серед студентів під час війни створює загрозу не лише для молоді, але й для всієї країни. Адже від сформованого у процесі навчання людського капіталу залежить швидкість повоєнної відбудови нашої країни.

На жаль, населення територій, що стали ареною для бойових дій, постійно перебуває під впливом цілого ряду стресових факторів. Травми і тривога, спричинені ракетними атаками, нічним переміщенням до укриття, руйнуванням житла, ризиком загинути від ракетного удару, розлукою з родиною, вбивством друзів руйнують психічне благополуччя свідків та учасників бойових дій. Не винятком при цьому є студенти. Зазвичай студентська молодь на територіях, охоплених війною, починає страждати від таких психічних розладів, як депресія, тривожність, посттравматичний стресовий розлад, розлади адаптації, розлади сну, які мають тенденцію здійснювати довготривалий негативний вплив на їхню систему емоційного реагування. Крім того, вплив стресових факторів під час війни може призвести до дисфункцій в індивідуальних механізмах подолання, які спричиняють залежності від вживання психоактивних речовин, азартних ігор або насильство (Inoue et al., 2021).

Серед психічних розладів, які активно поширюються серед населення під час війни, варто визначити депресію, тривожність, посттравматичний стресовий розлад (далі-ПТСР).

1. Депресія є найпоширенішим психічним розладом (за оцінками ВООЗ, понад 270 млн людей у світі страждають від депресії) та однією з основних причин інвалідності в усьому світі. Депресія характеризується сумом, втратою інтересу або задоволення, почуттям провини або низькою самооцінкою, порушенням сну або апетиту, втомою і поганою концентрацією уваги. Депресія може значно погіршувати здатність людини працювати та навчатися, а також керувати власним життям.

2. Тривожний розлад, який характеризується стійкою тривогою, не пов'язаною з конкретними об'єктами або ситуаціями, і супроводжується скаргами на постійну нервозність, тремтіння, м'язову напругу, пітливість, прискорене серцебиття, запаморочення, дискомфорт у сонячному сплетінні (American Psychiatric Association, 2013). Часто виникає страх "невідомого", а також інші різноманітні тривоги та погані передчуття.

3. Посттравматичний стресовий розлад, який може виникнути у людей, що пережили травматичну подію, серію подій або збіг обставин, включаючи війну / бойові дії, важкі фізичні травми, загрозу смерті, а також були свідками або співучасниками смерті інших людей (American Psychiatric Association, 2013). Люди із цим типом розладу мають інтенсивні, тривожні думки та почуття, пов'язані з пережитим. Важливо, що одним з основних симптомів ПТСР у молодих людей є надмірна втома, депресія, головні болі, нездатність зосередитися на чомусь, погіршення пам'яті, труднощі з навчанням.

Окреме місце серед психічних розладів також може займати залежність від вживання речовин та порушення сну. Молодь, яка страждає від залежностей, настільки фокусується на вживанні певних речовин – алкоголю, тютюну або наркотиків, що втрачають здатність до нормального функціонування в повсякденному житті. Як свідчить практика, зростання частоти вживання психоактивних речовин та алкоголю серед учасників бойових дій, студентів та

цивільного населення, яке постраждало від військового конфлікту, не є рідкістю (Patel, Zvinchuk, & Erickson, 2020, pp. 407–408).

Люди, які стикаються з прямою загрозою своєму життю, стали свідками або жертвами ракетних обстрілів і безпілотників, відчувають стрес і тривогу й часто намагаються впоратися із цими проблемами за допомогою вживання психоактивних речовин та алкоголю. Залежність може спричинити психологічні проблеми, а також міжособистісні проблеми, наприклад, із членами сім'ї, друзями або на роботі. Вживання психоактивних речовин призводить до невиконання важливих завдань в університеті чи вдома, а також зумовлює загальне зниження соціальної та академічної активності молоді.

Аналіз даних опитування, що включає 1398 респондентів засвідчив, що у 85,77 % студентів наявні симптоми депресії, у 66,09 % – симптоми тривоги, а у 48,14 % студентів – симптоми ПТСР. Варто зазначити, що отримані показники демонструють надзвичайно високий ступінь поширеності проблем у галузі ментального здоров'я серед здобувачів вищої освіти в Україні. Відповідаючи на запитання щодо кількості годин навчання, які студенти пропустили через проблеми із психічним здоров'ям протягом останніх двох тижнів, учасники опитування називали числа від 0 до 48 год із середнім значенням 5,72 год (стандартне відхилення становило 18,74 год). Узагальнення відповідей студентів на питання опитування щодо негативного впливу проблем з ментальним здоров'ям на успішність академічної діяльності протягом останніх у тижнів (за шкалою від 0 до 10), засвідчило, що найбільша кількість респондентів оцінювали негативний вплив проблем з ментальним здоров'ям на успішність їх академічної діяльності на рівні 3 із 10 (середнє значення 3,41 зі стандартним відхиленням 2,9).

Отримані дані опитувальника були використані для перевірки його надійності за параметрами Альфа Кронбаха та Омега МакДональда. За розрахунками, що здійснювалися в середовищі програми JASP 0.17.3, опитувальник продемонстрував високу надійність із показником Альфа Кронбаха на рівні 0,75 та Омега МакДональда на рівні 0,8. Репрезентативність вибірки підтверджується наявністю серед респондентів студентів різної статі, різного віку, курсу навчання, місця навчання та умов проживання.

На противагу проаналізованим вище науковим публікаціям, проведене дослідження дозволяє оцінити негативний вплив проблем у сфері ментального здоров'я на продуктивність академічної діяльності студентів в Україні під час війни, що особливо цінно для вдосконалення державної політики психосоціальної підтримки вразливих груп населення, які проживають на території, охоплених війною.

Дискусія і висновки

Результати дослідження продемонстрували негативний вплив проблем у сфері ментального здоров'я на продуктивність академічної діяльності студентів. Зокрема, студенти в середньому пропускали 5,72 год навчання через проблеми у сфері психічного здоров'я впродовж останніх 2-х тижнів перед

проведенням опитування, а також оцінювали негативний вплив даних проблем на продуктивність їхньої академічної діяльності на 3 із 10 балів у середньому. Відповідно, зниження академічної продуктивності серед студентів під час війни перешкоджає здобуттю знань та розвитку компетенцій, необхідних для майбутньої професійної кар'єри, не дозволяючи студентам після завершення навчання швидко знайти роботу і зміцнити трудовий потенціал держави, що особливо важливо в контексті повоєнної відбудови.

Таким чином, необхідність зміцнення людського капіталу на тлі викликів, зумовлених повномасштабною війною, обумовлює потребу в розробці та реалізації ефективної державної політики у сфері ментального здоров'я, що буде спрямована на захист студентської молоді. Реалізація зазначеної політики потребуватиме додаткових досліджень факторів, які спричиняють виникнення різних психічних розладів під час війни, а також сучасних інструментів профілактики та раннього виявлення розладів у здобувачів вищої освіти під час війни.

Подяки, джерела фінансування. Публікацію підготовлено за результатами наукового проєкту, який виконується за грантової підтримки Національного фонду досліджень України (реєстраційний номер проєкту: 2022.01/0030).

Список використаних джерел

- Назаренко, Ю., Когут, І., & Жерьобкіна, Т. (2022). *Освіта на окупованих територіях України: моніторинговий звіт*. Центр дослідження суспільства. <https://cedos.org.ua/wp-content/uploads/osvita-na-tymchasovo-okupovanyh-terytoryyah.pdf>
- Ніколаєв, Є., Рій, Г., & Шемелинець, І. (2023). *Вища освіта в Україні: зміни через війну: аналітичний звіт*. Київський університет імені Бориса Грінченка. <https://osvitanalityka.kubg.edu.ua/wp-content/uploads/2023/03/HigherEd-in-Times-of-War.pdf>
- Тимчук, А., & Панасюк, А. (2022). *Оперативна оцінка втрат активів сектору освіти України у зв'язку з війною (станом на липень 2022)*. Вокс Україна. <https://voxukraine.org/operativna-otsinka-vtrat-aktyviv-sektoru-osvity-ukrayiny-u-zv-yazku-z-vijnoyu-stanom-na-lypen-2022>
- American Psychiatric Association. (2013). *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders (DSM-5-TR)*. <https://www.psychiatry.org/psychiatrists/practice/dsm>
- Becker, G.S. (1962). Investment in Human Capital: A Theoretical Analysis. *Journal of Political Economy*, 70(5/2), 9–10. <http://www.nber.org/chapters/c13571>
- Inoue, C., Shawler, E., Jordan, C., & Jackson, C. (2021). Veteran and Military Mental Health Issues. *Treasure Island, StatPearls Publishing*, PMID: 34283458. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34283458/>
- Kurapov, A., Pavlenko, V., Drozdov, A., Bezliudna, V. et al. (2022). Toward an understanding of the Russian-Ukrainian war impact on university students and personnel. *Journal of Loss & Trauma*, 28(2), 167–174. <https://doi.org/10.1080/15325024.2022.2084838>
- Ministry of Education and Science of Ukraine. (2023). *Save schools*. <https://saveschools.in.ua/en/>
- Patel, S., Zvinchuk, O., & Erickson, T. (2020). The Conflict in East Ukraine: A Growing Need for Addiction Research and Substance Use Intervention for Vulnerable Populations. *Forensic Science and Addiction Research*, 5(3), 406–408, PMID: 32363331. <https://doi.org/10.31031/FSAR.2020.05.000616>
- Rugema, L., Mogren, I., Ntaganira, J., & Krantz, G. (2015). Traumatic episodes and mental health effects in young men and women in Rwanda, 17 years after the genocide. *BMJ Open*, 5(6), e006778. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2014-006778>
- Schultz, T. (1960). Capital Formation by Education. *Journal of Political Economy*, 68(6), 571–583. <https://doi.org/10.1086/258393>

Ukraine Education Cluster. (2022). *Ukraine higher education needs assessment. June 25 – October 25, 2022*. <https://reliefweb.int/report/ukraine/ukraine-higher-education-needs-assessment-25-june-25-october-2022>

World Health Organization. (2013). *Investing in mental health*. WHO Publishing. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241564618>

Yousef, L., Ebrahim, O., AlNahr, M.H., Mohsen, F., Ibrahim, N., Sawaf, B. (2021). War-related trauma and post-traumatic stress disorder prevalence among Syrian university students. *European Journal of Psychotraumatology*, 12(1). <https://doi.org/10.1080/20008198.2021.1954774>

References

American Psychiatric Association. (2013). *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders (DSM-5-TR)*. <https://www.psychiatry.org/psychiatrists/practice/dsm>

Becker, G.S. (1962). Investment in Human Capital: A Theoretical Analysis. *Journal of Political Economy*, 70(5/2), 9–10. <http://www.nber.org/chapters/c13571>

Inoue, C., Shawler, E., Jordan, C., & Jackson, C. (2021). Veteran and Military Mental Health Issues. *Treasure Island, StatPearls Publishing*, PMID: 34283458. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34283458/>

Kurapov, A., Pavlenko, V., Drozdov, A., Bezliudna, V. et al. (2022). Toward an understanding of the Russian-Ukrainian war impact on university students and personnel. *Journal of Loss & Trauma*, 28(2), 167–174. <https://doi.org/10.1080/15325024.2022.2084838>

Ministry of Education and Science of Ukraine. (2023). *Save schools*. <https://saveschools.in.ua/en/>

Nazarenko, Y., Kohut, I., & Zherobkyna, T. (2022). *Education in the occupied territories of Ukraine: monitoring report*. Centre for Society Research [in Ukrainian]. <https://cedos.org.ua/wp-content/uploads/osvita-na-tymchasovo-okupovanyh-terytoriyah.pdf>

Nikolayev, E., Riy, G., & Shemelinets, I. (2023). *Higher education in Ukraine: changes due to war: analytical report*. Borys Grinchenko Kyiv University [in Ukrainian]. <https://osvitanalityka.kubg.edu.ua/wp-content/uploads/2023/03/HigherEd-in-Times-of-War.pdf>

Patel, S., Zvinchuk, O., & Erickson, T. (2020). The Conflict in East Ukraine: A Growing Need for Addiction Research and Substance Use Intervention for Vulnerable Populations. *Forensic Science and Addiction Research*, 5(3), 406–408, PMID: 32363331. <https://doi.org/10.31031/FSAR.2020.05.000616>

Rugema, L., Mogren, I., Ntaganira, J., & Krantz, G. (2015). Traumatic episodes and mental health effects in young men and women in Rwanda, 17 years after the genocide. *BMJ Open*, 5(6), e006778. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2014-006778>

Schultz, T. (1960). Capital Formation by Education. *Journal of Political Economy*, 68(6), 571–583. <https://doi.org/10.1086/258393>

Tymchuk, A., & Panasiuk, A. (2022). *Operational assessment of losses of assets of the education sector of Ukraine in connection with the war*. Vox Ukraine [in Ukrainian]. <https://voxukraine.org/operatyvna-otsinka-vtrat-aktyviv-sektoru-osvity-ukrayiny-u-zv-yazku-z-vijnoyu-stanom-na-lypen-2022>

Ukraine Education Cluster. (2022). *Ukraine higher education needs assessment. June 25 – October 25, 2022*. <https://reliefweb.int/report/ukraine/ukraine-higher-education-needs-assessment-25-june-25-october-2022>

World Health Organization. (2013). *Investing in mental health*. WHO Publishing. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241564618>

Yousef, L., Ebrahim, O., AlNahr, M.H., Mohsen, F., Ibrahim, N., Sawaf, B. (2021). War-related trauma and post-traumatic stress disorder prevalence among Syrian university students. *European Journal of Psychotraumatology*, 12(1). <https://doi.org/10.1080/20008198.2021.1954774>

Отримано редакцією збірника / Received: 31.07.24

Прорецензовано / Revised: 29.08.24

Схвалено до друку / Accepted: 30.09.24

Volodymyr VIRCHENKO, DSc (Econ.), Assoc. Prof.

ORCID ID: 0000-0002-9085-6659

e-mail: virchenko_v@knu.ua

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

MENTAL HEALTH AND PRODUCTIVITY OF UKRAINIAN STUDENTS IN THE TIME OF WAR

Introduction. *The paper focuses on a comprehensive analysis of the mental health of university students during the war and its impact on the student's academic productivity in Ukraine.*

Methods. *The nature and features of students' mental health, as well as the specifics of changes in their mental condition during the period of study in higher education institutions under the impact of specific stress factors caused by martial law and the constant risks of missile attacks on peaceful cities and civilian infrastructure are considered.*

Results. *The main types of mental disorders and the prevalence of symptoms of depression, anxiety disorder, and post-traumatic stress disorder among Ukrainian students during the war were studied. An extremely high percentage of respondents with symptoms of depression (85 %) and anxiety disorder (66 %) were found. Based on the statistical analysis of the survey data of students of national universities, the negative impact of mental health problems on the productivity of their academic activities is substantiated.*

Conclusions. *It is proved that the onset of mental disorders among Ukrainian students during the war hinders the acquisition of knowledge and development of competencies necessary for future professional activities, which poses a threat to the successful post-war recovery of Ukraine's economy and requires adequate and timely measures in the field of public policy of mental health protection of student youth.*

Keywords: *mental health, war, productivity, academic performance, mental disorders.*

Автор В. Вірченко заявляє про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The author V. Virchenko declares no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

Георгій КРЕЙНІС, наук. співроб.

ORCID ID: 0000-0002-4470-1517

e-mail: gkreinis@gmail.com

Державна установа "Національний науковий центр
радіаційної медицини, гематології та онкології

Національної академії медичних наук України", Київ, Україна

ПСИХОЛОГІЧНІ ТА НЕЙРОФІЗІОЛОГІЧНІ ЗМІНИ У ВІЙСЬКОВОСЛУЖБОВЦІВ НАЦІОНАЛЬНОЇ ГВАРДІЇ УКРАЇНИ, ЩО ОХОРОНЯЛИ ДЕРЖАВНЕ СПЕЦІАЛІЗОВАНЕ ПІДПРИЄМСТВО "ЧОРНОБИЛЬСЬКА АЕС", ПІСЛЯ ЗВІЛЬНЕННЯ З ПОЛОНУ

Вступ. *Негативні ефекти, спричинені довготривалим перебуванням у військовому полоні, можуть мати глибинну, незворотну дію на організм людини, впливаючи як фізично, так і психічно на здоров'я. Метою дослідження було визначити особливості психологічних та нейрофізіологічних змін, у ранньому періоді після звільнення, військовослужбовців Національної гвардії України, які охороняли Державне спеціалізоване підприємство "Чорнобильська атомна електростанція" (ДСП ЧАЕС) та після початку повномасштабного вторгнення перебували в російському полоні. У військовослужбовців НГУ, які перебували у полоні, спостерігається помірно виражена стійка дисфункція кори головного мозку, а також ретикулярної формації стовбура головного мозку.*

Методи. *Під час дослідження були використані такі методи: квантифіковані психодіагностичні, нейропсихологічні, нейрофізіологічні та статистичні.*

Результати. *Виявлено достовірне зростання спектральної тета-потужності під час посилення психопатологічної тривожної, депресивної симптоматики, нейрокогнітивного дефіциту, а також симптомів посттравматичного стресового розладу (ПТСР).*

Висновки. *Виявлені тенденції можуть свідчити про наявність стійкої церебральної дисфункції внаслідок перебування у полоні як імовірного церебрального базису подальшого розвитку тривожно-депресивних станів і погіршення перебігу ПТСР та інших розладів, асоційованих зі стресом. Ці зміни потребують подальшого спостереження та вивчення.*

Ключові слова: *Чорнобильська АЕС, Національна гвардія України, посттравматичний стресовий розлад, комп'ютерна електроенцефалографія, Монреальська шкала оцінювання когнітивних функцій, нейрокогнітивний дефіцит.*

Вступ

Негативні ефекти, спричинені довготривалим перебуванням у військовому полоні, можуть мати глибинну, незворотну дію на організм людини, впливаючи як фізично, так і психічно на здоров'я.

Дії росії в Україні щодо поводження з військовополоненими, грубо порушують міжнародне гуманітарне право, зокрема Женевські конвенції (від 12 серпня 1949 року з додатковими протоколами), у яких наголошено, що всі

захоплені в полон комбатанти мають право на статус військовополонених та на захист, який він передбачає (Верховна Рада України, 1949/2023). Численні повідомлення та факти свідчать про те, що українські військовополонені зазнають катувань, фізичного насильства та нелюдського поводження в російському полоні, зокрема побиття, ураження електричним струмом, катування водою та сексуальне насильство (United Nations Human Right, 2024, Mar 26).

Унаслідок перебування в полоні такі фактори, як обмежене харчування і прийому рідини, порушення санітарно-гігієнічних норм, призводять до втрати ваги, виснаження м'язів, ослаблення імунітету, інфекційних захворювань, тривалого хронічного болю та порушення фізіологічних функцій (Shanks, 2023). Під час комплексного медичного обстеження військовослужбовців Національної гвардії України, які перебували у російському полоні, були виявлені системні порушення з боку внутрішніх органів та опорно-рухового апарату, обміну речовин, шкіри та її придатків.

Дослідження особливостей функціонального стану центральної нервової та когнітивних функцій в осіб, що перебували у військовому полоні, є актуальним і багатоплановим завданням. Існують багато факторів, що здатні прямо або опосередковано впливати на функціональний стан центральної нервової системи (ЦНС) (Логановський, & Куц, 2016; 2017). *Фізична травма*: військовополонені часто зазнають фізичних катувань і жорстокого поводження, що може призвести до черепно-мозкових травм (ЧМТ) та інших неврологічних ушкоджень (Саминін, & Соколова, 2023). Подібні ушкодження можуть погіршити когнітивні функції, пам'ять, увагу та емоційну регуляцію (Jukić et al., 2023). *Психологічна травма*: психологічний стрес, спричинений полоном, ізоляцією, депривацією та постійною загрозою насильства, може призвести до посттравматичного стресового розладу (ПТСР), тривоги, депресії та інших розладів психічного здоров'я (Stein et al., 2017). Ці стани здатні ще більше порушити когнітивні функції та погіршити процес прийняття рішень, концентрацію уваги та пам'ять (Gates et al., 2012; Kokun et al., 2020). *Недоїдання та депривація*: військовополонені часто страждають від недоїдання, недосипання і відсутності доступу до базової гігієни та медичної допомоги. Навмисні та злочинні обмеження призводять до загострення наявних неврологічних та когнітивних розладів, а також сприяють розвитку нових (Ursano, Fullerton, & Norwood, 2003). Навіть після звільнення багато військовополонених продовжують боротися з довготривалими неврологічними та когнітивними порушеннями, які можуть суттєво впливати на якість життя, працездатність та соціальні відносини (Meziab et al., 2014).

Наразі, на жаль, опубліковано обмаль досліджень, що вивчають неврологічні та когнітивні наслідки полону і катувань на військовополонених (Широбоков, 2020; Апальков, 2023). Ці дослідження спрямовані на те, щоб краще зрозуміти основні механізми цих порушень і розробити ефективні стратегії лікування (Timchenko et al., 2021; Швець, 2022).

Підходи до лікування зазвичай передбачають поєднання медикаментозного лікування, психотерапії та когнітивної реабілітації для подолання як фізичних, так і психологічних аспектів порушень (Тимченко, & Широбоков, 2019). Раннє втручання та комплексна підтримка мають вирішальне значення для допомоги військовополоненим у відновленні та реінтеграції в суспільство.

Методи

На базі відділу радіаційної психоневрології Державної установи "Національний науковий центр радіаційної медицини гематології та онкології" Національної академії медичних наук України (ННЦРМГО) було обстежено 64 військовослужбовці Сил оборони України чоловічої статі (дослідження є складовою науково-дослідних робіт, що були схвалені рішеннями Комітету з медичної етики ННЦРМГО від 15 червня 2022 року та 12 квітня 2024 року, відповідно). Основну групу (35 осіб) становили військовослужбовці Національної гвардії України (НГУ), які охороняли Державне спеціалізоване підприємство "Чорнобильська атомна електростанція" (ДСП ЧАЕС) до початку повномасштабної війни і 24 лютого 2022 року потрапили у полон до російських загарбників (звільнені у листопаді 2022 року та січні 2023 року). Групу порівняння (29 осіб) становили військовослужбовці Збройних сил України (ЗСУ), які брали безпосередню участь у бойових діях. Вік обстежених складав 21-46 років, середній вік ($M \pm SD$) $32,3 \pm 5,7$. Всі обстежені мали вищу або середню спеціальну освіту та були містянами. Представники обох груп зазнали впливу психоемоційного стресу внаслідок екстремальних обставин, але сценарії психотравмуючих подій були різними.

Були використані такі методи дослідження: *квантифіковані психодіагностичні* (шкала самооцінювання проявів посттравматичного стресового розладу (ПТСР) PCL-5; опитувальник загального здоров'я (General Health Questionnaire, GHQ-28) для вивчення соматоформних симптомів, тривоги / безсоння, соціальної дисфункції і тяжкої депресії; шкала самооцінювання депресії Зунга (Zung Self-Rating Depression Scale, SDS) для визначення немаскованої депресії; шкала Спілбергера–Ханіна для визначення особистісної та реактивної тривожності); *нейропсихологічні* (Монреальська шкала оцінювання когнітивних функцій (Montreal Cognitive Assessment, MoCa); *нейрофізіологічні* (реєстрація та картування параметрів квантифікованої електроенцефалограми (кЕЕГ), зорових викликаних потенціалів на реверсивний шаховий патерн (ЗВПШВ) та зорових когнітивних викликаних потенціалів (ЗКВП); *статистичні*.

Результати

У групі НГУ кореляційний аналіз виявив достовірне зростання амплітуди слухових когнітивних викликаних потенціалів (СКВП) у фронто-центральному відведенні ($r = 0,33$, $p < 0,05$), а також зменшення показника латенції до амплітуди в правому центральному відведенні ($r = -0,38$, $p < 0,05$) зі зростанням балів за Монреальською когнітивною шкалою, що є варіантом нормальної психофізіологічної реакції. Натомість показники СКВП достовірно

погіршувались зі зростанням вираженості симптомів посттравматичних стресових розладів. Зокрема, показник латенція / амплітуда в лівому лобному відведенні позитивно корелював із загальним балом шкали PCL-5 ($r = 0,36$, $p < 0,05$), а також із балами за субшкалами PCL-5C (уникнення) ($r = 0,50$, $p < 0,05$), та PCL-5D (негативні думки та настрої) ($r = 0,41$, $p < 0,05$). При цьому амплітуда P300 у лівому лобному відведенні негативно корелювала з балами за субшкалами PCL-5C (уникнення) ($r = -0,46$, $p < 0,01$), та PCL-5D (негативні думки та настрої) ($r = -0,39$, $p < 0,05$). Такі зміни відбивають наявність об'єктивних ознак нейрокогнітивного дефіциту, асоційованого з симптомами ПТСР, у групі НГУ.

За шкалою МоСА групи НГУ та ЗСУ за рівнем когнітивних функцій достовірно не відрізнялися одна від одної ($p > 0,05$). Однак у досліджуваних із групи ЗСУ спостерігався достовірно гірший нейрокогнітивний дефіцит порівняно з групою НГУ ($t = 2,2$; $p < 0,05$), а також нижчі показники повторення речень, кількості слів, відстроченого пригадування та орієнтації ($t = 2,6$; $p < 0,05$). Таким чином, група ЗСУ продемонструвала достовірне погіршення когнітивних функцій порівняно з групою НГУ переважно за рахунок короткочасної вербальної пам'яті, уваги та ознак дезорієнтації в просторі та часі.

Регресійний аналіз (коефіцієнт рангової кореляції Спірмена, r_s) виявив достовірні негативні кореляційні зв'язки ($p < 0,05$) між показниками за шкалою МоСА візуальної пам'яті та показниками за шкалою PCL-5 кластера С (симптоми уникнення, пов'язані з травматичною подією), між показниками за шкалою МоСА візуальної пам'яті та показниками за шкалою PCL-5 кластера Е (симптоми надмірної реактивності), між показниками за шкалою МоСА затримки пригадування та показниками за шкалою PCL-5 кластера D (негативні думки та емоції), між показниками за шкалою МоСА орієнтації та показниками симптомів уникнення за шкалою PCL-5, а також між показниками за шкалою МоСА візуальної пам'яті та показниками PCL-5 за всіма критеріями (кластер А) у групі НГУ (табл. 1).

Таблиця 1

**Нейропсихологічні показники в обстежених групах
військовослужбовців НГУ та ЗСУ, (M±SD)**

Шкала, тест, показник	НГУ $n = 35$	t -критерій, p	ЗСУ $n = 29$
Когнітивне функціонування за МоСА	24,9 ± 1,9	$t = -0,3$ $p = 0,7$	25,2 ± 2,0
Когнітивне функціонування за MMSE	26,3 ± 1,4	$t = 0,6$ $p = 0,5$	27,0 ± 1,5
Шкала самооцінки PTSD (PCL-5), сумарний бал	50,6 ± 14,2	$t = 0,7$ $p = 0,5$	46,2 ± 15,1
Шкала самооцінки PTSD (PCL-5), критерій В (симптоми інтрузії)	14,6 ± 5,5	$t = 1,2$ $p = 0,3$	12,1 ± 4,9

Закінчення табл. 1

Шкала, тест, показник	НГУ $n = 35$	t -критерій, p	ЗСУ $n = 29$
Шкала самооцінки PTSD (PCL-5), критерій С (симптоми уникнення)	$4,2 \pm 3,2$	$t = 0,3$ $p = 0,8$	$3,9 \pm 2,3$
Шкала самооцінки PTSD (PCL-5), критерій D (негативні думки та емоції)	$14,9 \pm 8,2$	$t = 0,2$ $p = 0,9$	$14,5 \pm 6,6$
Шкала самооцінки PTSD (PCL-5), критерій E (симптоми надмірної реактивності)	$16,5 \pm 4,0$	$t = 0,5$ $p = 0,6$	$15,7 \pm 3,8$
Сумарний бал GHQ-28, sum	$41,6 \pm 14,4$	$t = -0,7$ $p = 0,5$	$45,6 \pm 10,3$
Соматизація, GHQ-28A	$13,3 \pm 3,8$	$t = 0,0$ $p = 1,0$	$13,3 \pm 3,9$
Тривога і дисомнія, GHQ-28B	$12,0 \pm 4,3$	$t = -0,8$ $p = 0,4$	$13,6 \pm 4,4$
Соціальна дисфункція, GHQ-28C	$11,1 \pm 4,2$	$t = -0,4$ $p = 0,7$	$11,8 \pm 3,5$
Тяжка депресія, GHQ-28D	$5,1 \pm 4,1$	$t = -0,3$ $p = 0,7$	$5,7 \pm 3,0$
Шкала самооцінки депресії Зунга	$63,6 \pm 12,3$	$t = -0,3$ $p = 0,8$	$65,0 \pm 12,0$
Шкала Спілбергера-Ханіна, реактивна тривожність	$57,3 \pm 7,1$	$t = 0,1$ $p = 0,9$	$56,8 \pm 9,1$
Шкала Спілбергера-Ханіна, особистісна тривожність	$54,3 \pm 10,2$	$t = 0,4$ $p = 0,7$	$52,7 \pm 9,2$

Дискусія і висновки

У військовослужбовців НГУ виявлено ознаки гіперактивації кортиколімбічної системи переважно правої (субдомінантної) півкулі, фізіологічної гіперзбудливості основних сенсорних систем, функціональної гіпофронтальності у вигляді прискорення латенцій та збільшення амплітуд компонента P100 ЗВПШП. Дані СКВП вказують на надлишковий, неекономічний та неефективний патерн реагування ЦНС на когнітивні стимули у вигляді зменшення латенцій та амплітуд компонента P300, що асоційований зі значним погіршенням виконання когнітивних завдань (особливо пов'язаних із концентрацією уваги, короткостроковою вербальною пам'яттю та зорово-просторовими функціями) і може бути психофізіологічною відповіддю на пролонгований психоемоційний стрес. Зафіксовано достовірне зростання спектральної тета-потужності під час посилення психопатологічної тривожної, депресивної симптоматики, нейрокогнітивного дефіциту, а також симптомів ПТСР. Виявлені тенденції можуть свідчити про наявність стійкої церебральної дисфункції як імовірного церебрального базису подальшого розвитку тривожно-депресивних станів, погіршення зорово-просторових функцій, короткочасної вербальної пам'яті, орієнтації в просторі та часі, пов'язане з розвитком ПТСР та інших розладів, асоційованих зі стресом.

Беручи до уваги високий преморбідний рівень нервово-психічного здоров'я групи обстежуваних (професійні військові, які проходили регулярні психолого-медичні огляди) до початку повномасштабного вторгнення рф, виявлені зміни свідчать про необхідність посиленого пролонгованого нейропсихіатричного моніторингу та, за потреби, відповідних лікувально-профілактичних втручань.

Різні види стресу, пов'язані з війною, по-різному впливають на постраждалих щодо ймовірного розвитку ПТСР. Українські комбатанти, які брали безпосередню участь у бойових діях, а також ті, хто тривалий час перебували в полоні, мають більший ризик розвитку ПТСР та пов'язаних із ним когнітивних розладів.

Вважається за потрібне розроблення системи довготривалої нервово-психічної реабілітації для різних категорій осіб, які постраждали внаслідок російсько-української війни, з метою уникнення розвитку у цих осіб довготривалих нервово-психічних розладів, у тому числі ПТСР.

Дослідження нервово-психічних наслідків різних видів стресу, пов'язаних з російсько-українською війною, необхідно продовжувати.

Список використаних джерел

Апальков, В.В. (2023). *Психологічні механізми регуляції поведінки військовополонених засобами символічної мімікрії*. [Дис. канд. психол. наук (д-ра філософії), Національний університет оборони України імені Івана Черняховського]. Державний обліковий номер: 0823U100459. <https://nuou.org.ua/assets/documents/dr-ker-apal-23.pdf>

Верховна Рада України. (2023, 23 жовтня). *Женевська конвенція про захист цивільного населення під час війни* (документ 995_154 від 1949, 12 серпня, ред.: лист МЗС № 72/14-612-20689 від 23.02.2023). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_154

Логановський, К., & Куц, К. (2016). Когнітивні викликані потенціали P300 після опромінення. *Проблеми радіаційної медицини і радіобіології*, 21, 264–290. https://radiationproblems.org.ua/21_2016_ukr_s264.html

Логановський, К., & Куц, К. (2017). Викликана біоелектрична активність головного мозку після опромінення. *Проблеми радіаційної медицини і радіобіології*, 22, 38–68. https://radiationproblems.org.ua/22_2017_ua_s38.html

Саминін, Я., & Соколова, І. (2023). Когнітивні та емоційно-афективні розлади в учасників бойових дій із черепно-мозковою травмою (огляд літератури). *Український неврологічний журнал*, 1–4, 28–44. <https://doi.org/10.30978/UNJ2023-1-4-28>

Тимченко, О., & Ширококов, Ю. (2019). Психологічна феноменологія сучасного військового полону. У С.Д. Максименко, С.Б. Кузікова, В.Л. Зливков (Ред.), *Психологічні технології ефективного функціонування та розвитку особистості*. (Т. 3, с. 224–246). http://psychology-naes-ua.institute/files/pdf/1_1562758276.pdf

Швець, А. (2022). Прогностична оцінка потреби у медичній реабілітації військовослужбовців Збройних Сил України на основі даних структури їх бойової травми. *Український журнал військової медицини*, 3(3), 110–117. [https://doi.org/10.46847/ujmm.2022.3\(3\)-110](https://doi.org/10.46847/ujmm.2022.3(3)-110)

Ширококов, Ю.М. (2020). *Психологія військового полону*. [Дис. д-ра психол. наук., Національний університет цивільного захисту України]. Бібліотека Національного університету цивільного захисту України. <https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/spetsializovani-vcheni-rady/22/shurobokov.pdf>

Gates, M.A., Holowka, D.W., Vasterling, J., Terence, M., Keane, T.M., Marx, B.P., & Rosen, R.C. (2012). Posttraumatic stress disorder in veterans and military personnel: epidemiology, screening, and case recognition. *Psychological services*, 9(4), 361–382. <https://doi.org/10.1037/a0027649>

Jukic, M., Malenica, L., Duricic, V., Talapko, J., Lukinac, J., Jukic, M., & Škrlec, I. (2023). Long-Term Consequences of War Captivity in Military Veterans. *Healthcare*, 11(14). <https://doi.org/10.3390/healthcare11141993>

Kokun, O., Agayev, N., Pischko, I., & Stasiuk, V. (2020). Characteristic impacts of combat stressors on posttraumatic stress disorder in Ukrainian military personnel who participated in the armed conflict in eastern Ukraine. *International Journal of Psychology & Psychological Therapy*, 20(3), 315–326. <https://www.ijpsy.com/volumen20/num3/554.html>

Meziab, O., Kirby, K.A., Williams, B., Yaffe, K., Byers, A.L., & Barnes, D.E. (2014). Prisoner of war status, posttraumatic stress disorder, and dementia in older veterans. *Alzheimer's & Dementia: The Journal of the Alzheimer's Association*, 10(3, Suppl), 236–241. <https://doi.org/10.1016/j.jalz.2014.04.004>

Shanks, G.D. (2023). Gastrointestinal Mortality in Military / Prison Camps of the 19th-20th Centuries. *The Journal of Military and Veterans' Health*, 31(4), 29–32. <https://doi.org/doi:10.2023-79933527/JMVH Vol 31, No 4>

Stein, J.Y., Itzhaky, L., Levi-Belz, Y., & Solomon, Z. (2017). Traumatization, loneliness, and suicidal ideation among former prisoners of war: A longitudinally assessed sequential mediation model. *Frontiers in Psychiatry*, 8, 281. <https://doi.org/10.3389/fpsy.2017.00281>

Timchenko, O., Prychodko I., Shyrobokov, Yu., Onishchenko, & N., Lefterov, V. (2021). Psychological Aspects of Captivity in the War in the East of Ukraine. *Polish Psychological Bulletin*, 52(1) 97–106. <https://doi.org/10.24425/ppb.2021.136820>

United Nations Human Right. (2024, Mar 26). *Report On The Human Rights Situation In Ukraine (1 December 2023 – 29 February, 2024)*. <https://www.ohchr.org/sites/default/files/documents/countries/ukraine/2024/report-human-rights-situation-ukraine-1-dec-2023-29-feb-2024.pdf>

Ursano, R.J., Fullerton, C.S., & Norwood, A.E. (2003). Terrorism and disasters: Prevention, intervention, and recovery. In R.J. Ursano, C.S. Fullerton, & A.E. Norwood (Eds.), *Terrorism and disaster: Individual and community mental health interventions* (pp. 333–339). Cambridge University Press. <https://doi.org10.1192/pb.28.5.186-a>

References

Apalkov, V.V. (2023). *Psychological mechanisms of regulating the behavior of prisoners of war by means of symbolic mimicry*. [Diss. of the candidate of psychological sciences (PhD), The National Defense University of Ukraine named after Ivan Cherniakhovskyi]. State registration number: 0823U100459 [in Ukrainian]. <https://nuou.org.ua/assets/documents/dr-kep-apal-23.pdf>

Gates, M.A., Holowka, D.W., Vasterling, J., Terence, M., Keane, T.M., Marx, B.P., & Rosen, R.C. (2012). Posttraumatic stress disorder in veterans and military personnel: epidemiology, screening, and case recognition. *Psychological services*, 9(4), 361–382. <https://doi.org/10.1037/a0027649>

Jukic, M., Malenica, L., Duricic, V., Talapko, J., Lukinac, J., Jukic, M., & Škrlec, I. (2023). Long-Term Consequences of War Captivity in Military Veterans. *Healthcare*, 11(14). <https://doi:10.3390/healthcare11141993>

Kokun, O., Agayev, N., Pischko, I., & Stasiuk, V. (2020). Characteristic impacts of combat stressors on posttraumatic stress disorder in Ukrainian military personnel who participated in the armed conflict in eastern Ukraine. *International Journal of Psychology & Psychological Therapy*, 20(3), 315–326. <https://www.ijpsy.com/volumen20/num3/554.html>

Lohanovskiy, K., & Kuts, K. (2016). Cognitive evoked potentials P300 after irradiation. *Problemy radiatsiinoi medytsyny i radiobiologii Problems of radiation medicine and radiobiology*, 21, 264–290 [in Ukrainian]. https://radiationproblems.org.ua/21_2016_ukr_s264.html

Lohanovskiy, K., & Kuts, K. (2017). Evoked bioelectrical activity of the brain after irradiation. *Problemy radiatsiinoi medytsyny i radiobiologii Problems of radiation medicine and radiobiology*, 22, 38–68 [in Ukrainian]. https://radiationproblems.org.ua/22_2017_ua_s38.html

Meziab, O., Kirby, K.A., Williams, B., Yaffe, K., Byers, A.L., & Barnes, D.E. (2014). Prisoner of war status, posttraumatic stress disorder, and dementia in older veterans. *Alzheimer's & Dementia: The Journal of the Alzheimer's Association*, 10(3, Suppl), 236–241. <https://doi.org/10.1016/j.jalz.2014.04.004>

Samynin, Ya., & Sokolova, I. (2023). Cognitive and emotional-affective disorders in combatants with traumatic brain injury (literature review). *Ukrainskyi nevrolohichnyi zhurnal Ukrainian Neurological Journal*, 1-4, 28–44 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.30978/UNJ2023-1-4-28>

Shanks, G.D. (2023). Gastrointestinal Mortality in Military / Prison Camps of the 19th-20th Centuries. *The Journal of Military and Veterans' Health*, 31(4), 29–32. <https://doi-ds.org/doi/10.2023-79933527/JMVH Vol 31 No 4>

Stein, J.Y., Itzhaky, L., Levi-Belz, Y., & Solomon, Z. (2017). Traumatization, loneliness, and suicidal ideation among former prisoners of war: A longitudinally assessed sequential mediation model. *Frontiers in Psychiatry*, 8, 281. <https://doi.org/10.3389/fpsy.2017.00281>

Shvets, A. (2022). Prognostic assessment of the need for medical rehabilitation of military personnel of the Armed Forces of Ukraine based on data on the structure of their combat trauma. *Ukrainskyi zhurnal viiskovoi medytsyny Ukrainian Journal of Military Medicine*, 3(3), 110–117 [in Ukrainian]. [https://doi.org/0.46847/ujmm.2022.3\(3\)-110](https://doi.org/0.46847/ujmm.2022.3(3)-110)

Shyrobokov, Yu.M. (2020). *Psychology of military captivity*. [Diss. DSc (Psych.), National University of Civil Defense of Ukraine]. Library of the National University of Civil Defense of Ukraine [in Ukrainian]. <https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/spetsializovani-vcheni-rady/22/shyrobokov.pdf>

Timchenko, O., Prychodko I., Shyrobokov, Yu., Onishchenko, & N., Lefterov, V. (2021). Psychological Aspects of Captivity in the War in the East of Ukraine. *Polish Psychological Bulletin*, 52(1) 97–106. <https://doi.org/10.24425/ppb.2021.136820>

Tymchenko, O., & Shyrobokov, Yu. (2019). Psychological phenomenology of modern military captivity. In S.D. Maksymenko, S.B. Kuzikova, V.L. Zlyvko (Eds.), *Psychological technologies for effective functioning and personality development* (Vol. 3, pp. 224–246) [in Ukrainian]. http://psychology-naes-ua.institute/files/pdf/1_1562758276.pdf

United Nations Human Right. (2024, Mar 26). *Report On The Human Rights Situation In Ukraine (1 December 2023 – 29 February, 2024)*. <https://www.ohchr.org/sites/default/files/documents/countries/ukraine/2024/report-human-rights-situation-ukraine-1-dec-2023-29-feb-2024.pdf>

Ursano, R.J., Fullerton, C.S., & Norwood, A.E. (2003). Terrorism and disasters: Prevention, intervention, and recovery. In R.J. Ursano, C.S. Fullerton, & A.E. Norwood (Eds.), *Terrorism and disaster: Individual and community mental health interventions* (pp. 333–339). Cambridge University Press. <https://doi.org10.1192/pb.28.5.186-a>

Verkhovna Rada of Ukraine. (2023, Oct. 23). *Geneva Convention relative to the Protection of Civilian Persons in Time of War* (document 995_154 dated 1949, August 12, ed.: letter of the Ministry of Foreign Affairs No. 72/14-612-20689 dated 02/23/2023) [in Ukrainian]. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_154

Отримано редакцією збірника / Received: 05.08.24

Прорецензовано / Revised: 22.08.24

Схвалено до друку / Accepted: 23.10.24

Heorhii KREINIS, Researcher

ORCID ID: 0000-0002-4470-1517

e-mail: gkreinis@gmail.com

State Institution "National Research Center for Radiation Medicine,
Hematology and Oncology, National Academy of Medical Sciences of Ukraine",
Kyiv, Ukraine

PSYCHOLOGICAL AND NEUROPHYSIOLOGICAL CHANGES IN THE SERVICEMEN OF THE NATIONAL GUARD OF UKRAINE WHO GUARDED THE CHERNOBYL SSNP AFTER RELEASE FROM CAPTIVITY

Introduction. *The negative effects caused by long-term captivity in war can have a profound, irreversible effect on the human body, affecting both physical and mental health. The negative effects caused by prolonged detention in captivity can have a profound, irreversible impact on the human body, affecting both physical and mental health. The number of studies examining the neurological and cognitive effects of captivity and torture on prisoners*

of war is still very limited. The aim of the study was to determine the peculiarities of psychological and neurophysiological changes in the early period after release of the National Guard of Ukraine servicemen who guarded the ChNPP and were held in Russian captivity after the beginning of the full-scale invasion. Russia's actions in Ukraine, including its treatment of prisoners of war, are in flagrant violation of international humanitarian law. The negative effects caused by prolonged captivity can have a profound, irreversible impact on the human body, affecting both physical and mental health. The servicemen of the National Guard of Ukraine who were held in captivity have moderately pronounced persistent dysfunction of the cerebral cortex and reticular formation of the brain stem.

Methods. *The following methods were used during the study: quantified psychodiagnostic, neuropsychological, neurophysiological, and statistical.*

Results. *A significant increase in spectral theta power was detected with an increase in psychopathological anxiety, depressive symptoms, neurocognitive deficits, and PTSD symptoms.*

Conclusions. *The identified trends may indicate the presence of persistent cerebral dysfunction due to captivity as a possible cerebral basis for the further development of anxiety and depression and the worsening of PTSD and other stress-related disorders. These changes require further observation and study.*

Keywords: *Chornobyl NPP, National Guard of Ukraine, PTSD, cEEG, MoCa, neurocognitive deficit.*

Автор Г. Крейніс заявляє про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The author H. Kreinis declares no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

КУРС УПРАВЛІННЯ СТРЕСОМ "САМОДОПОМОГА ПЛЮС" В УНІВЕРСИТЕТАХ

Вступ. В умовах повномасштабної війни Росії проти України студенти університетів стикаються із численними викликами та стресовими ситуаціями, які негативно впливають на їхнє психічне здоров'я. Курс управління стресом для дорослих "Самодопомога Плюс" спрямований на надання студентам університетів практичних навичок для подолання стресу і покращення психічного здоров'я. Під час проведення кожної сесії на курсі учасникам було запропоновано пройти коротке опитування для оцінювання задоволеності проведенням та організацією курсу і надати можливість студентам написати свої відгуки стосовно знань, які вони отримують під час занять. До сьогодні в Україні відсутні будь-які дослідження групового курсу "Самодопомога Плюс", тому було прийнято рішення щодо проведення попереднього дослідження для оцінювання ризиків, з якими можуть стикнутися в подальшому впровадженні курсу.

Методи. Пілотне дослідження, проведене серед студентів факультету психології Київського національного університету імені Тараса Шевченка, які пройшли цей курс, показало їхнє позитивне ставлення до курсу. Студенти показали високу зацікавленість та зазначили актуальність цього курсу в реаліях України.

Результати. Учасники пілотного проєкту також вказали на значне підвищення рівня навичок у наданні психологічної допомоги під час стресу, покращення в управлінні емоціями та загальне підвищення якості життя і повідомили про те, що вони порадили б колегам цей курс також.

Висновки. Результати дослідження вказали на необхідність впровадження таких програм у навчальних закладах для підтримки психічного здоров'я студентів та підвищення їхньої обізнаності у питаннях ментального здоров'я.

Ключові слова: стрес, самодопомога, управління стресом, стрес-менеджмент, психічне здоров'я, студенти.

Вступ

У сучасних умовах повномасштабної війни Росії проти України життя університетських студентів є надзвичайно напруженим і сповненим численних викликів. Постійні загрози, невизначеність майбутнього, втрата близьких та рідних, а також необхідність пристосовуватись до нових умов навчання та роботи, створюють значний психологічний тиск. Це середовище сприяє підвищенню рівня стресу, тривожності та депресії. Відсутність ефективних навичок управління стресом за таких умов може мати серйозні наслідки для психічного здоров'я, що, у свою чергу, негативно впливає на здатність до навчання. Груповий курс "Самодопомога Плюс" [Self-Help Plus] (SH+) розроблений Всесвітньою організацією охорони здоров'я (ВООЗ) для надання

учасникам практичних інструментів для подолання стресу, розвитку навичок саморегуляції та покращення загального самопочуття. Програма враховує специфіку життя студентів під час війни, дозволяючи їм ефективно використовувати отримані знання та вміння у повсякденному житті. Це сприяє зміцненню психічного здоров'я в умовах постійного стресу та невизначеності. Результати трьох рандомізованих контрольованих досліджень у країнах Західної Європи, Південного Судану та Туреччини показали значне зменшення психологічного стресу серед учасників, які пройшли курс SH+. Ці результати засвідчили його ефективність програми в запобіганні виникнення психічних розладів. Аналіз результатів дослідження ефективності психологічного втручання SH+ у запобіганні розвитку психічних розладів серед сирійських біженців, які переживали психологічний стрес у Туреччині, показав, що SH+ не був ефективним одразу після втручання, але був пов'язаний із сприятливим ефектом після шестимісячного спостереження щодо симптомів депресії, визначених особисто, та якості життя (Acarturk et al., 2022). Хоча згідно з дослідженням серед біженців, які перемістилися в Західну Європу, SH+ показало, що, вивчаючи наслідки профілактичного втручання в розвиток психіки вони не виявили профілактичного ефекту SH+ на наявність ознак психічних розладів під час шестимісячного спостереження, яке було основним результатом, але було виявлено значну різницю на користь SH+ у зниженні частоти поточних психічних розладів після негайного втручання (Purgato et al., 2021).

У дослідженні, проведеному в Північному Судані, було зазначено, що SH+ – це інноваційна групова самодопомога під керівництвом фасилітатора, яка може бути швидко застосована до великої кількості учасників і призведе до значного зменшення психологічного стресу через 3 місяці серед жінок-біженок (Tol et al., 2020). З урахуванням того, що у світі дослідження щодо оцінювання ефективності курсу SH+ серед студентів попередньо не проводилися, метою цього дослідження став аналіз реакції студентської молоді на інноваційний формат проведення курсу та отримання відгуків для подальшого оцінювання ефективності курсу щодо зменшення психологічного стресу.

Методи

Пілотне дослідження проводилося з використанням як кількісного, так і якісного підходів для оцінювання ефективності курсу "Самодопомога Плюс" серед студентів. Основною метою було оцінювання задоволеності учасників курсу та отримання зворотного зв'язку для подальшого впровадження в університетах. У пілотному дослідженні взяли участь студенти факультету психології Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Загалом у пілотному дослідженні взяли участь 34 студенти, які добровільно погодилися прослухати курс. Анкети, що використовувались під час пілотного дослідження, були розроблені фасилітаторами курсу та містили запитання про задоволеність проведенням курсу, його змістом, організацією та корисністю отриманих знань і навичок. Після кожної сесії курсу учасникам було

запропоновано заповнювати анкету оцінювання кожної сесії та написати свої думки стосовно отриманих знань і навичок. Це дозволило комплексно оцінити ефективність курсу "Самодопомога Плюс" і визначити напрями його вдосконалення та подальшого впровадження в університетах.

Результати

У період з 06.10.2023 р. по 16.02.2024 р. на факультеті психології Київського національного університету імені Тараса Шевченка було проведено груповий курс управління стресом для дорослих "Самодопомога Плюс". Фасилітаторами на курсі виступили співробітники Інституту психіатрії Київського національного університету імені Тараса Шевченка, що отримали попередньо відповідну сертифікацію в представництві ВООЗ Україна та є дійсними тренерами з цього курсу.

Під час проведення кожної сесії на курсі учасникам було запропоновано пройти коротке опитування для оцінювання задоволеності проведенням та організацією курсу і надати можливість студентам написати свої відгуки стосовно знань, які вони отримують під час занять. Опитування складалося із 4 блоків: загальні питання (вік, стать, місце навчання); оцінювання задоволеності курсом (оцініть від 1 до 5, наскільки студент задоволений якістю курсу, навчальних матеріалів і курсу в цілому, де 1 – дуже задоволений, а 5 – дуже незадоволений); оцінювання актуальності навчання та чи будуть студенти рекомендувати цей курс своїм колегам; блок відкритих запитань. Студентів попросили описати основні аспекти курсу, який вони пройшли, що їм сподобалося, що було складним і незрозумілим, а також будь-які інші коментарі.

Всього було проведено чотири групи (34 студенти) віком від 19 до 40 років, переважна більшість студентів жіночої статі – 32 (94,1 %) і 2 (5,9 %) чоловічої статі. Кожна група мала 5 сесій протягом 3-4 тижнів, 1 або 2 сесії на тиждень. Одна сесія займала 90–100 хв, що складається приблизно з 50 хв попередньо записаного аудіозапису та 30–40 хв інтерактивних занять, включаючи обговорення у парах. Всім студентам, що проходили курс SH+, було додатково надано два ілюстрованих посібники з посиланнями на аудіофайли для самостійного відпрацювання навичок між сесіями. Також для кожної групи було створено групу на платформі Telegram, де студенти могли обмінюватися досвідом поза межами сесій, задавати додаткові запитання фасилітаторам та отримували нагадування щодо необхідності практикування набутих навичок у вільний час. Фактичний час заняття міг змінюватись залежно від таких факторів, як запитання учасників і час, необхідний для дискусій. Особливістю зазначеного курсу порівняно з іншими груповими заняттями стало те, що для передачі більшої частини змісту використовували попередньо записане аудіо та ілюстративний матеріал. Під час кожного заняття учасники прослуховували аудіозаписи, що допомагали модерувати проведення курсу. Під час прослуховування студенти отримували загальну інформацію щодо ментального здоров'я та опис навичок, які пропонує цей курс для боротьби зі стресом. Курс передбачає, що учасники не будуть ділитися особистою

інформацією один з одним або з фасилітаторами, а зосередяться на вивченні навичок самодопомоги для управління стресом. Фасилітатори на курсі SH+ супроводжували учасників, демонструючи аудіозаписи, розглядаючи навички, представлені в них, наводили цікаві приклади та практичні пояснення, а також пропонували питання для обговорення, щоб зробити групу інтерактивною. Нові навички розкривалися на кожному занятті і розглядалися в кожному розділі книги "Важливі навички в період стресу: Ілюстроване керівництво".

Після кожного заняття студенти мали час для самостійного відпрацювання набутих навичок до наступного заняття. Це дозволило студентам поділитися своїми враженнями від використання навичок у повсякденному житті. У цілому 85,3 % студентів виявилися дуже задоволені та 14,7 % відповіли, що задоволені своїм досвідом навчання на курсі SH+. Майже кожний студент зазначив, що цей курс підвищив його навички в наданні психологічної допомоги під час стресу. Абсолютно всі з опитаних студентів зазначили, що інформація, яку вони отримали від викладача під час курсу, була корисною та 91,2 % рекомендували цей курс своїм колегам. Водночас фасилітаторами було вказано на те, що деякі студенти пропускали в середньому 1 ± 2 сесії, але це не вплинуло на засвоєння навичок, оскільки програмою курсу передбачено можливість пропуску 1 ± 2 сесії. На наступній сесії учасники мали змогу спробувати відпрацювати пропущену навичку перед демонстрацією нової навички поточної сесії.

Учасники зазначили покращення у спроможності керувати емоціями, поліпшення взаємин з оточуючими та загальне підвищення якості життя. Серед основних висновків, які студенти сформували після проходження занять, варто виділили необхідність практикування набутих навичками, потребу в усвідомленому ставленні до свого ментального здоров'я й отримання знань, як подолати стрес. Студенти зазначили, що їм сподобався формат проведення цього курсу, зокрема атмосфера роботи в групі де є відчуття безпеки, взаємоповаги та залученості, яку створює фасилітатор під час проведення занять, та можливість обговорити свій досвід з іншими учасниками. При цьому студенти також зазначили, що їм складно сприймати інформацію з аудіозаписів, що передбачені курсом, тому повторення інформації фасилітатором, наявні підручники та покрокове практичне відпрацювання вправ допомагають роз'яснити, як саме застосовувати набуті навички.

Дискусія і висновки

Підсумковий результат вказує на позитивні відгуки з боку студентів щодо курсу "Самодопомога Плюс" в університетському середовищі. Це дослідження дозволило оцінити ризики, які можуть виникнути під час подальшого впровадження курсу SH+ в університетах та в майбутніх дослідженнях щодо оцінювання ефективності групової інтервенції "Самодопомога Плюс" для профілактики психічних розладів серед українських студентів з легкими та помірними симптомами стресу. Отримані результати вказують на важливість таких програм у навчальних закладах для підтримки психічного здоров'я

учасників навчального процесу. У перспективі впровадження курсу "Самодопомога Плюс" може стати основою для розробки комплексних програм підтримки психічного здоров'я в університетах. Це дозволить створити сприятливі умови для навчання, зменшити рівень стресу серед студентів, а також підвищити загальну ефективність навчального процесу. Розширення таких програм і їх адаптація до специфічних потреб кожного університету може сприяти покращенню психічного здоров'я на національному рівні.

Подяки, джерела фінансування. Дане дослідження виконано в рамках наукового дослідження "Інноваційна модель захисту ментального здоров'я студентської молоді у воєнний та повоєнний періоди" за грантової підтримки Національного фонду досліджень України (державний реєстраційний номер: 0123U103503).

Список використаних джерел

Acarturk, C., Uygun, E., Ilkkursun, Z., Carswell, K., Tedeschi, F., Batu, M., Eskici, S., Kurt, G., Anttila, M., Au, T., Baumgartner, J., Churchill, R., Cuijpers, P., Becker, T., Koesters, M., Lantta, T., Nosè, M., Ostuzzi, G., Popa, M., ... & Barbui, C. (2022). Effectiveness of a self-help psychological intervention for preventing mental disorders among Syrian refugees in Turkey: a randomized trial. *World Psychiatry*, 21, 88–95. <https://doi.org/10.1002/wps.20939>

Purgato, M., Carswell, K., Tedeschi, F., Acarturk, C., Anttila, M., Au, T., Bajbouj, M., Baumgartner, J., Biondi, M., Churchill, R., Cuijpers, P., Koesters, M., Gastaldon, C., Ilkkursun, Z., Lantta, T., Nosè, M., Ostuzzi, G., Papola, D., Popa, M., ... & Barbui, C. (2021). Effectiveness of Self-Help Plus in Preventing Mental Disorders in Refugees and Asylum Seekers in Western Europe: A Multinational Randomized Controlled Trial. *Psychotherapy and Psychosomatics*, 90(6), 403–414. <https://doi.org/10.1159/000517504>

Tol, W.A., Leku, M.R., Lakin, D.P., Carswell, K., Augustinavicius, J., Adaku, A., Au, T.M., Brown, F.L., Bryant, R.A., Garcia-Moreno, C., Musci, R.J., Ventevogel, P., White, R.G., van Ommeren, M. (2020). Guided self-help to reduce psychological distress in South Sudanese female refugees in Uganda: a cluster randomised trial. *The Lancet Global Health*, 8(2), 254–e263. [https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(19\)30504-2](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(19)30504-2)

References

Acarturk, C., Uygun, E., Ilkkursun, Z., Carswell, K., Tedeschi, F., Batu, M., Eskici, S., Kurt, G., Anttila, M., Au, T., Baumgartner, J., Churchill, R., Cuijpers, P., Becker, T., Koesters, M., Lantta, T., Nosè, M., Ostuzzi, G., Popa, M., ... & Barbui, C. (2022). Effectiveness of a self-help psychological intervention for preventing mental disorders among Syrian refugees in Turkey: a randomized trial. *World Psychiatry*, 21, 88–95. <https://doi.org/10.1002/wps.20939>

Purgato, M., Carswell, K., Tedeschi, F., Acarturk, C., Anttila, M., Au, T., Bajbouj, M., Baumgartner, J., Biondi, M., Churchill, R., Cuijpers, P., Koesters, M., Gastaldon, C., Ilkkursun, Z., Lantta, T., Nosè, M., Ostuzzi, G., Papola, D., Popa, M., ... & Barbui, C. (2021). Effectiveness of Self-Help Plus in Preventing Mental Disorders in Refugees and Asylum Seekers in Western Europe: A Multinational Randomized Controlled Trial. *Psychotherapy and Psychosomatics*, 90(6), 403–414. <https://doi.org/10.1159/000517504>

Tol, W.A., Leku, M.R., Lakin, D.P., Carswell, K., Augustinavicius, J., Adaku, A., Au, T.M., Brown, F.L., Bryant, R.A., Garcia-Moreno, C., Musci, R.J., Ventevogel, P., White, R.G., van Ommeren, M. (2020). Guided self-help to reduce psychological distress in South Sudanese female refugees in Uganda: a cluster randomised trial. *The Lancet Global Health*, 8(2), 254–e263. [https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(19\)30504-2](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(19)30504-2)

Отримано редакцію збірника / Received: 06.08.24

Прорецензовано / Revised: 14.08.24

Схвалено до друку / Accepted: 30.09.24

Nataliia PIMENOVA, 1st Category Specialist

ORCID ID: 0000-0003-3767-2575

e-mail: natalia.pimenova@knu.ua

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

STRESS MANAGEMENT COURSE "SELF-HELP PLUS" IN UNIVERSITIES

Introduction. *These theses present the results of the study of the preliminary implementation of the "Self-Help Plus" (SH+) course at the university. To date, there are no studies in the world evaluating the effectiveness of the SH+ course on students, and it has not been investigated how the course can affect the educational process.*

Methods. *To begin with, it was necessary to obtain a general evaluation for the SH+ course from the students. This should provide insight into the future risks that may be encountered when introducing the course into students' curricula. In total, 4 groups (34 students) of the Faculty of Psychology of Taras Shevchenko National University of Kyiv passed. Each group had 5 sessions over 3-4 weeks, 1 or 2 sessions per week. After each session, students were given time to independently practice the acquired skills before the next session. This allowed students to share their impressions of using skills in everyday life.*

Results. *To assess the need for and interest in this course, students were asked to complete a short survey after each session. All students were satisfied with the conduct, quality and organization of this course. Each student said that he recommended this training to his colleague and that this course was relevant and increased his learning in this topic. Among the difficult or incomprehensible, students noted the following: it is difficult to perceive audio recordings, it is difficult to think about painful situations, it is difficult to follow some instructions. At the end of the final facilitation sessions, some students requested a training session for facilitators to spread knowledge among students.*

Conclusions. *Expanding such programs and adapting them to the unique needs of each university can have a positive impact on mental health at the national level.*

Keywords: *stress, self-help, stress management, mental health, students.*

Автор Н. Піменова заявляє про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The author N. Pimenova declares no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

УДК 616.89-008.454:616.395:616-001.28

DOI: <https://doi.org/10.17721/3041-1491/2024.11-51>

Костянтин КУЦ¹, канд. мед. наук

ORCID ID: 0000-0003-1954-3075

e-mail: kvk0906@gmail.com

Ірина ПЕРЧУК¹, канд. мед. наук, провід. наук. співроб.

ORCID ID: 0000-0002-2537-2113

e-mail: iperchuk76@gmail.com

Георгій КРЕЙНІС¹, наук. співроб.

ORCID ID: 0000-0002-4470-1517

e-mail: gkreinis@gmail.com

Катерина АНТИПЧУК¹, канд. мед. наук, ст. наук. співроб.

ORCID ID: 0000-0001-8463-7874

e-mail: psyho2011@gmail.com

Злата ВАСИЛЕНКО¹, зав. від-ня радіац. психоневрології

Scopus ID: 56561067200

e-mail: vasilenkozlata@ukr.net

¹Державна установа "Національний науковий центр

радіаційної медицини, гематології та онкології

Національної академії медичних наук України", Київ, Україна

ПОСТРАДІАЦІЙНИЙ НЕЙРОКОГНІТИВНИЙ ДЕФІЦИТ У ОСІБ, ЩО ПОСТРАЖДАЛИ ВНАСЛІДОК АВАРІЇ НА ЧОРНОБИЛЬСЬКІЙ АТОМНІЙ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

Вступ. Метою дослідження було верифікувати та об'єктивізувати порушення когнітивного функціонування при хронічній цереброваскулярній патології у віддаленому періоді після впливу малих доз іонізуючої радіації внаслідок Чорнобильської катастрофи. Порушення когнітивної сфери при хронічній цереброваскулярній патології в учасників ліквідації наслідків аварії (УЛНА) на Чорнобильській атомній електростанції (ЧАЕС) у віддаленому післяаварійному періоді характеризується сполученням розсіяної мікровогнищевої неврологічної симптоматики; емоційно-поведінкових розладів із суто когнітивними розладами (зниження пам'яті і концентрації уваги; елементи акустико-мнестичної афазії; порушення мислення, розуміння, планування, цілепокладання та суджень) у структурі хронічної ішемії головного мозку, церебрального атеросклерозу, гіпертонічної енцефалопатії та органічних психічних і поведінкових розладів.

Методи. Виявлений нейропсихологічний патерн когнітивних розладів при цереброваскулярній патології після опромінення відповідає легкому/помірному когнітивному порушенню. Характерними рисами цього когнітивного дефіциту є зміни вербальної пам'яті та навчання, зниженні безпосереднього запам'ятовування, короткочасної пам'яті та ретроактивної інтерференції.

Результати. При опроміненні в дозах понад 0,3 Зв в УЛНА був виявлений характерний додозалежний психометричний патерн, який полягає у достовірному зниженні показників актуального загального, вербального та невербального коефіцієнтів інтелектуальності (Intelligence Quotient, IQ), визначених за шкалою

© Куц Костянтин, Перчук Ірина, Крейнис Георгій,
Антипчук Катерина, Василенко Злата, 2024

інтелекту Векслера для дорослих (Wechsler Adult Intelligence Scale, WAIS) при одночасному зростанні дефіциту даних показників порівняно з преморбідними (доаварійними) рівнями. Дефіцит загального IQ за рахунок зниження вербального IQ можна розглядати як нейропсихологічний маркер когнітивних порушень в УЛНА, що віддзеркалює ураження лівої (домінантної) півкулі головного мозку.

Висновки. Необхідні подальші психіатричні клініко-епідеміологічні дослідження з дозиметричним супроводом, оцінюванням соматоневрологічного здоров'я, можливих когнітивних і психотичних симптомів контингентів, постраждалих унаслідок Чорнобильської катастрофи.

Ключові слова: *нейрокогнітивний дефіцит, іонізуюче випромінювання, Чорнобильська катастрофа, УЛНА на ЧАЕС, преморбідний інтелект, коефіцієнт інтелектуальності.*

Вступ

Вплив на психічне здоров'я і нейропсихіатричні наслідки Чорнобильської катастрофи були окреслені, як: 1) психологічні та психосоматичні розлади; 2) довгострокові порушення психічного здоров'я, включаючи депресію, посттравматичний стресовий розлад (ПТСР) і зловживання алкоголем; 3) цереброваскулярна та інша органічна патологія центральної нервової системи; 4) когнітивні розлади; 5) ефекти на головний мозок, що розвиваються; 6) потенційні радіоцеребральні ефекти; 7) синдром хронічної втоми; 8) самогубства (Bennet, Repacholi, & Carr, 2006, p. 93; Бази́ка, 2021, с. 142). Головними чинниками ризику негативного соціально-психологічного і медичного впливу радіаційної надзвичайної ситуації (на відміну від радіотерапевтичних і радіодіагностичних процедур) є психологічний стрес, сприйняття ризику та іонізуюче випромінювання (ІВ), які призводять до соціальних змін, порушень фізичного і психічного здоров'я, зокрема депресивних розладів (Логановський, 2014; Loganovsky, Loganovska, & Kuts, 2018). Радіаційно-асоційований нейрокогнітивний дефіцит в учасників ліквідації наслідків аварії (УЛНА) на Чорнобильській атомній електростанції (ЧАЕС) багато в чому пов'язаний із цереброваскулярною патологією, але нейродегенеративні та аутоімунні процеси безумовно залучені, що потребує подальших досліджень (Логановський та ін., 2016). Когнітивні порушення в осіб, постраждалих внаслідок аварії на ЧАЕС, становлять значну медико-соціальну проблему, що обумовлює необхідність розробки ефективних методів їх діагностики, профілактики та лікування.

Методи

Дизайн дослідження – проспективне клінічне дослідження з наявністю груп нозологічного та нормативного контролю, обстежених на базі відділу радіаційної психоневрології Державної установи "Національний науковий центр радіаційної медицини Національної академії медичних наук України" (ННЦРМ) у 2013–2017 роках. Основну групу становили 185 УЛНА на ЧАЕС чоловічої статі в 1986–1987 рр. у віці 44–65 років і середньому віці ($M \pm SD$) $56,3 \pm 5,4$ року з наявністю записів про дози опромінення у Клініко-епідеміологічному реєстрі (КЕР) ННЦРМ та верифікованою хронічною

цереброваскулярною патологією (ЦВП). Жодному пацієнту не була діагностована гостра променева хвороба (ГПХ). Групу нозологічного контролю становили 25 неопромінених осіб чоловічої статі з верифікованою хронічною ЦВП, які не зазнали впливу ІВ, вік $55,8 \pm 4,58$ ($n = 25$). Нормативну групу становили практично здорові особи чоловічої статі, які не зазнали впливу ІВ, середній вік $55,98 \pm 6,73$ ($n = 25$). Використовувались нейропсихологічні методи (коротка шкала оцінювання психічного статусу (Mini-Mental State examination, MMSE); тест аудиторно-вербального навчання Рея (Rey Auditory Verbal Learning Test, RAVLT); шкала інтелекту Векслера для дорослих (WAIS); рівняння регресії для розрахунку преморбідних коефіцієнтів інтелектуальності (IQ) за В. Gao; статистичні методи (методи дескриптивної статистики, варіаційної статистики (параметричні та непараметричні, кореляційний аналіз).

Результати

Діапазон доз зовнішнього опромінення обстежених УЛНА на ЧАЕС становив 0,0002–1,23 Зв за середньої арифметичної дози ($M \pm SD$): $0,24 \pm 0,23$ Зв, середньої геометричної дози 0,12 Зв, медіанної дози 0,2 Зв із міжквартильним розмахом 0,06–0,3 Зв. В усіх обстежених основної групи та групи нозологічного контролю було діагностовано хронічну цереброваскулярну патологію легкого та помірного ступеня (дисциркуляторна енцефалопатія I–II ступеня) у вигляді хронічної ішемії головного мозку (Міжнародна класифікація хвороб 10-го перегляду, МКХ-10: I67.8), церебрального атеросклерозу (МКХ-10: I67.2) та гіпертонічної енцефалопатії (МКХ-10: I67.4).

В основній групі та групі нозологічного контролю виявлені нижчі показники MMSE, ніж у нормативній групі, причому в основній групі – на рівні легкого / помірного когнітивного дефіциту ($p < 0,05$). Дослідження вербальної пам'яті за методикою RAVLT виявило статистично достовірне зниження безпосереднього запам'ятовування, короткотривалої та довготривалої пам'яті в групі УЛНА та групі нозологічного контролю ($p < 0,05$ – $0,01$).

У результаті аналізу профілю субтестів WAIS виявлено зниження оцінок за рядом субтестів, здебільшого вербальних, в основній групі порівняно з нормативною групою, зокрема: "Обізнаність" ($p < 0,05$), "Тямущість" ($p < 0,01$), "Арифметичний" ($p < 0,01$), "Повторення цифр" ($p < 0,01$), "Словниковий" ($p < 0,001$), "Шифрування" ($p < 0,001$) та "Послідовні малюнки" ($p < 0,05$), більш виражене в УЛНА на ЧАЕС, опромінених у дозах понад 0,05 Зв. Оцінки за субтестом "Тямущість" в основній групі виявились також нижчими, ніж у групі нозологічного контролю ($p < 0,05$).

Дефіцит IQ розраховувався на підставі різниці між преморбідним IQ та актуальним (фактичним) IQ. Показники частоти дефіциту IQ наведено на рис. 1, з якого випливає достовірне відносне зниження IQ, переважно за рахунок повного та вербального IQ, в основній групі. Ці зміни мають тенденцію до посилення при опроміненні в дозах понад 0,3 Зв. Такі порушення когнітивних функцій в обстежених УЛНА на ЧАЕС є свідченням органічного ураження головного мозку з порушеннями функціонування лівої, домінантної півкулі головного мозку.

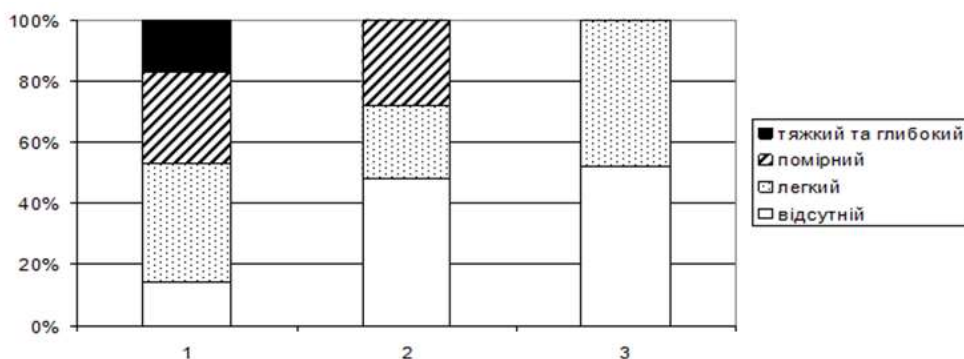


Рис. 1. Частота когнітивного дефіциту різних ступенів при порівнянні преморбідного з актуальним загальним IQ
(1 – основна група; 2 – група нозологічного контролю; 3 – нормативна група)

При опроміненні в дозах понад 0,3 Зв в УЛНА був виявлений характерний дозозалежний психометричний патерн, який полягає в достовірному зниженні показників актуального (фактичного) загального, вербального та невербального IQ при одночасному зростанні дефіциту даних показників порівняно з преморбідними (доаварійними) рівнями. Коефіцієнти лінійної кореляції за Пірсоном (r) для показників фактичного IQ при опроміненні в дозах понад 0,3 Зв становили $r = -0,49$ — $-0,57$, $p < 0,05$, а для дефіциту показників IQ: $r = 0,54$ – $0,69$, $p < 0,05$ – $0,01$, відповідно.

Порушення когнітивної сфери при хронічній цереброваскулярній патології в УЛНА на ЧАЕС у віддаленому післяаварійному періоді характеризується сполученням розсіяної мікроегнищеві неврологічної симптоматики; емоційно-поведінкових розладів із суто когнітивними розладами (зниження пам'яті та концентрації уваги; елементи акустико-мнестичної афазії; порушення мислення, розуміння, планування, цілепокладання та суджень) у структурі хронічної ішемії головного мозку, церебрального атеросклерозу, гіпертонічної енцефалопатії та органічних психічних і поведінкових розладів (Куц, 2018). Виявлений нейропсихологічний патерн когнітивних розладів при цереброваскулярній патології після опромінення відповідає легкому / помірному когнітивному порушенню (Куц, 2018). Характерними рисами цього когнітивного дефіциту є зміни вербальної пам'яті та навчання, зниженні безпосереднього запам'ятовування, короточасної пам'яті та ретроактивної інтерференції (Куц, 2018; Loganovsky et al., 2018). Дослідження вербальної пам'яті з використанням тесту аудиторно-вербального навчання Рея (Rey Auditory Verbal Learning Test, RAVLT) виявило статистично достовірне зниження безпосереднього запам'ятовування, короткотривалої та довготривалої пам'яті в УЛНА на ЧАЕС (Куц, 2018). При опроміненні в дозах понад 0,3 Зв в УЛНА був виявлений характерний дозозалежний психометричний патерн, який полягає в достовірному зниженні показників актуального загального, вербального та

невербального IQ, визначених за шкалою інтелекту Векслера для дорослих (Wechsler Adult Intelligence Scale, WAIS) при одночасному зростанні дефіциту даних показників порівняно з преморбідними (доаварійними) рівнями. Дефіцит загального IQ за рахунок зниження вербального IQ можна розглядати як нейропсихологічний маркер когнітивних порушень в УЛНА, що віддзеркалює ураження лівої (домінантної) півкулі головного мозку (Логановський, & Куц, 2018, с. 53). Нами було розроблено діагностичні критерії нейрокогнітивного дефіциту при хронічній цереброваскулярній патології у віддалений період після впливу іонізуючої радіації в діапазоні малих доз унаслідок Чорнобильської катастрофи (Куц, 2018).

Необхідні подальші психіатричні клініко-епідеміологічні дослідження з дозиметричним супроводом, оцінюванням соматоневрологічного здоров'я, можливих когнітивних і психотичних симптомів контингентів, постраждалих унаслідок Чорнобильської катастрофи (Bazyka et al., 2015).

Дискусія і висновки

Нейропсихологічний патерн когнітивних розладів при цереброваскулярній патології у віддалений період після опромінення внаслідок аварії на ЧАЕС відповідає легкому / помірному когнітивному порушенню. Характерними рисами цього когнітивного дефіциту є зміни вербальної пам'яті та навчання, зниженні безпосереднього запам'ятовування, короткочасної пам'яті та ретроактивної інтерференції. В УЛНА на ЧАЕС виявлено зниження актуального загального та вербального IQ порівняно з преморбідними рівнями IQ, які посилюються при дозах зовнішнього опромінення понад 0,3 Зв. Дефіцит загального IQ за рахунок зниження вербального IQ можна розглядати як нейропсихологічні маркери когнітивних порушень в УЛНА на ЧАЕС із хронічною цереброваскулярною патологією, які відбивають латералізацію ураження до лівої (домінантної) гемісфери головного мозку із ключовим залученням гіпокампу.

Внесок авторів: Костянтин Куц – концептуалізація, методологія, програмне забезпечення, формальний аналіз, валідація даних, написання – оригінальна чернетка; Ірина Перчук – написання – перегляд і редагування; Георгій Крейніс – написання – перегляд і редагування; Катерина Антипчук – написання – перегляд і редагування; Злата Василенко – написання – перегляд і редагування.

Список використаних джерел

Бази́ка, Д.А. (Ред.). (2021). *Тридцять п'ять років Чорнобильської катастрофи: радіологічні та медичні наслідки, стратегії захисту та відродження*. Державна установа "Національний науковий центр радіаційної медицини", Національної академії медичних наук України". https://nrcrm.gov.ua/downloads/2021/national_report_2021.pdf

Куц, К.В. (2018). *Нейрокогнітивний дефіцит при хронічній цереброваскулярній патології в осіб, які зазнали дії іонізуючого випромінювання в діапазоні малих доз внаслідок Чорнобильської катастрофи* [Дис. канд. мед. наук]. Державна установа "Національний науковий центр радіаційної медицини Національної академії медичних наук України".

Логановський, К.М. (2014). Охорона психічного здоров'я при радіаційних аваріях на ядерних реакторах та застосуванні "брудної бомби" і тактичної ядерної зброї (К.М. Логановський,

О.О. Петриченко, О.М. Морозов та ін., Ред.). МОЗ України, НАМНУ, Український центр наукової медичної інформації і патентно-ліцензійної інформації. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3750.0408>

Логановський, К.М., & Куц, К.В. (2018). Визначення рівня преморбідного інтелекту з використанням шкали інтелекту Векслера для дорослих як ефективний засіб верифікації та експертизи нейрокогнітивного дефіциту в учасників ліквідації наслідків аварії на Чорнобильській АЕС. *Український неврологічний журнал*, 1, 46–55. <http://ukrneuroj.com.ua/article/view/128932>

Логановський, К.М., Чумак, С.А., Бомко, М.О., Антипчук, К.Ю., Логановська, Т.К., Колосинська, О.О., Чупровська, Н.Ю., Зданевич, Н.А., Гресько, М.В., Куц, К.В., & Крейніс, Г.Ю. (2016). Цереброваскулярні захворювання та інші ураження головного мозку у постраждалих внаслідок Чорнобильської катастрофи. *Журнал Національної академії медичних наук України*, 22(2), 163–178. https://www.researchgate.net/publication/313698172_CEREBROVASCULAR_DISEASES_AND_OTHER_LESIONS_OF_THE_BRAIN_OF_CHORNOBYL_DISASTER_VICTIMS

Bazyka, D., Buzunov, V., Ilyenko, I., & Loganovsky, K. (2015). Epidemiology and molecular studies in cerebrovascular disease at the late period after radiation exposure in Chernobyl. In K.P. Mishra (Ed.), *Biological responses, monitoring and protection from radiation exposure* (pp. 69–84). Nova Science Publishers Inc. https://www.researchgate.net/publication/286071542_Epidemiology_and_molecular_studies_in_cerebrovascular_disease_at_the_late_period_after_radiation_exposure_in_Chernobyl

Bennet, B., Repacholi, M., & Carr, Zh. (Eds.). (2006). *Health effects of the Chernobyl accident and special health care programmes*. Report of the UN Chernobyl Forum Expert Group "Health" (EGH). World Health Organization. https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/43447/9241594179_eng.pdf

Loganovsky, K.N., Bomko, M.O., Abramenko, I.V., Kuts, K.V., Belous, N.I., Masiuk, S.V., Gresko, M.V., Loganovska, T.K., Antypchuk, K.Yu., Perchuk, I.V., Kreinis, G.Yu., & Chumak, S.A. (2018). Neuropsychobiological mechanisms of affective and cognitive disorders in the Chernobyl clean-up workers taking into account the specific gene polymorphisms. *Probl. Radiac. Med. Radiobiol.*, 23, 373–409. <https://doi.org/10.33145/2304-8336-2018-23-373-409>

Loganovsky, K., Loganovskaja, T., & Kuts, K. (2018). Psychophysiology research in the detection of ionizing radiation effects. In F. Chiappelli (Ed.), *Advances in psychobiology* (pp. 63–152). Nova Science Publishers Inc.

References

Basyka, D.A. (Ed.). (2021). *Thirty-five years of the Chernobyl disaster: radiological and medical consequences, strategies protection and revival. National report of Ukraine*. State Institution "National Research Center for Radiation Medicine", National Academy of Medical Sciences of Ukraine [in Ukrainian]. https://nrcrm.gov.ua/downloads/2021/national_report_2021.pdf

Bazyka, D., Buzunov, V., Ilyenko, I., & Loganovsky, K. (2015). Epidemiology and molecular studies in cerebrovascular disease at the late period after radiation exposure in Chernobyl. In: K.P. Mishra (Ed.), *Biological responses, monitoring and protection from radiation exposure* (pp. 69–84). Nova Science Publishers Inc. https://www.researchgate.net/publication/286071542_Epidemiology_and_molecular_studies_in_cerebrovascular_disease_at_the_late_period_after_radiation_exposure_in_Chernobyl

Bennet, B., Repacholi, M., & Carr, Zh. (Eds.). (2006). *Health effects of the Chernobyl accident and special health care programmes*. Report of the UN Chernobyl Forum Expert Group "Health" (EGH). World Health Organization. https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/43447/9241594179_eng.pdf

Kuts, K.V. (2018). *Neurocognitive deficit in chronic cerebrovascular pathology in the individuals exposed to ionizing radiation in low doses range due to the Chernobyl accident* [Diss. PhD Med. Sciences]. State Institution "National Research Center for Radiation Medicine of National Academy of Medical Sciences of Ukraine" [in Ukrainian].

Loganovsky, K.N., Bomko, M.O., Abramenko, I.V., Kuts, K.V., Belous, N.I., Masiuk, S.V., Gresko, M.V., Loganovska, T.K., Antypchuk, K.Yu., Perchuk, I.V., Kreinis, G.Yu., & Chumak, S.A. (2018). Neuropsychobiological mechanisms of affective and cognitive disorders in the Chernobyl clean-up workers taking into account the specific gene polymorphisms. *Probl. Radiac. Med. Radiobiol.*, 23, 373–409. <https://doi.org/10.33145/2304-8336-2018-23-373-409>

Loganovsky, K., Loganovskaja, T., & Kuts, K. (2018). Psychophysiology research in the detection of ionizing radiation effects. In F. Chiappelli (Ed.), *Advances in psychobiology* (pp. 63–152). Nova Science Publishers Inc.

Loganovsky, K.N., Kuts, K.V. (2018). Determination of the premorbid intelligence using the Wechsler Adult Intelligence Scale as an effective way to verify and assess neurocognitive deficit in the Chernobyl clean-up workers. *Ukrainian neurological journal*, 1, 46–55 [in Ukrainian]. <http://ukrneuroj.com.ua/article/view/128932>

Lohanovskiy, K.M. (2014). Mental Health Protection in Radiation Accidents at Nuclear Reactors and the use of "dirty bombs" and tactical nuclear weapons. *Methodical recommendations* (K.M. Lohanovskiy, O.O. Petrychenko, O.M. Morozov et al. (Eds.). Ministry of Health of Ukraine, NAMNU, Ukrainian Center of Scientific Medical Information and Patent and Licensing Information [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3750.0408>

Lohanovskiy, K.M., Chumak, S.A., Bomko, M.O., Antypchuk, K.Iu., Lohanovska, T.K., Kolosynska, O.O., Chuprovskaya, N.Iu., Zdanevych, N.A., Hresko, M.V., Kuts, K.V., & Kreinis, H.Iu. (2016). Cerebrovascular diseases and other brain lesions in victims of the Chernobyl disaster. *Zhurnal Natsionalnoi akademii medychnykh nauk Ukrainy Journal of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine*, 22(2), 163–178 [in Ukrainian]. https://www.researchgate.net/publication/313698172_CEREBROVASCULAR_DISEASES_AND_OTHER_LESIONS_OF_THE_BRAIN_OF_CHORNOBYL_DISASTER_VICTIMS

Отримано редакцією збірника / Received: 09.08.24

Прорецензовано / Revised: 22.08.24

Схвалено до друку / Accepted: 30.09.24

Kostiantyn KUTS¹, PhD (Med.)

ORCID ID: 0000-0003-1954-3075

e-mail: kvk0906@gmail.com

Iryna PERCHUK¹, PhD (Med.), Leading Researcher

ORCID ID: 0000-0002-2537-2113

e-mail: iperchuk76@gmail.com

Heorhii KREINIS¹, Researcher

ORCID ID: 0000-0002-4470-1517

e-mail: gkreinis@gmail.com

Kateryna ANTYPCHUK¹, PhD (Med.), Senior Researcher

ORCID ID: 0000-0001-8463-7874

e-mail: psyho2011@gmail.com

Zlata VASYLENKO¹, Head of the Radiation Psychoneurology Branch

Scopus ID: 56561067200

e-mail: vasilenkozlata@ukr.net

¹State Institution "National Research Center for Radiation Medicine, Hematology and Oncology of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine", Kyiv, Ukraine

POST-RADIATION NEUROCOGNITIVE DEFICIT IN PERSONS AFFECTED BY THE CHORNOBYL ACCIDENT

Introduction. *The aim of the study was to verify and objectify the impairment of cognitive functioning in chronic cerebrovascular pathology in the remote period after exposure to low doses of ionizing radiation as a result of the Chernobyl accident. Impairment of the cognitive sphere in chronic cerebrovascular pathology in the Chernobyl clean-up workers in the remote post-accident period is characterized by a combination of scattered*

microfocal neurological symptoms; emotional and behavioral disorders with purely cognitive disorders (decreased memory and concentration; elements of acoustic-mnestic aphasia; impaired thinking, understanding, planning, goal-setting and judgment) in the structure of chronic cerebral ischemia, cerebral atherosclerosis, hypertensive encephalopathy and organic mental and behavioral disorders.

Methods. *The revealed neuropsychological pattern of cognitive impairment in cerebrovascular pathology after radiation corresponds to mild / moderate cognitive impairment.*

Results. *In those exposed to doses above 0.3 Sv, a characteristic dose-dependent psychometric pattern was detected in the Chornobyl clean-up workers, which consists in a significant decrease in the indicators of actual general, verbal and non-verbal IQ determined by the Wechsler Adult Intelligence Scale (WAIS) with a simultaneous increase in the deficit of these indicators compared to premorbid (pre-accident) levels. Deficits in total IQ due to a decrease in verbal IQ can be considered as a neuropsychological marker of post-radiation cognitive impairment, reflecting lesions in the left (dominant) hemisphere of the brain.*

Conclusions. *Further psychiatric clinical and epidemiological studies with dosimetric support, assessment of somatoneurological health, possible cognitive and psychotic symptoms of contingents affected by the Chornobyl disaster are needed.*

Key words: *neurocognitive deficit, ionizing radiation, Chornobyl disaster, Chornobyl clean-up workers, premorbid intelligence, intelligence quotient.*

Автори К. Куц, І. Перчук, Г. Крейніс, К. Антипчук та З. Василенко заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors K. Kuts, I. Perchuk, H. Kreinis, K. Antypchuk and Z. Vasylenko declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

Галина ПИЛЯГІНА, д-р мед. наук, проф.

ORCID ID: 0000-0003-0169-1256

e-mail: gpil.doctor@gmail.com

Національний університет охорони здоров'я України імені П.Л. Шупика,

Київ, Україна

Богдан ПУХОВСЬКИЙ, асп.

ORCID ID: 0009-0003-4652-669X

e-mail: bohdan.puhovskiy@gmail.com

Національний університет охорони здоров'я України імені П.Л. Шупика,

Київ, Україна

САМОРУЙНІВНА ПОВЕДІНКА ПРИ ДЕПРЕСИВНИХ РОЗЛАДАХ У ПІДЛІТКОВОМУ ВІЦІ

Вступ. На сьогодні спостерігається тенденція зростання рівня самогубств, самоушкодження при депресивних розладах (ДР) у підлітковому та юнацькому віці. Коморбідне поєднання саморуйнівної поведінки (СрПв) та ДР у підлітковому віці є однією з найважливіших та глобальних проблем сучасної клінічної психіатрії.

Методи. Серед основних причин ДР – хронічний соціальний стрес, пов'язаний із війною, проблеми насильства в сім'ї та школі, низька нервово-психологічна стійкість дітей та молоді тощо.

Результати. За результатами проведеного дослідження було доведено, що в юнацькому віці ДР мають 100 % коморбідність із СрПв. Статеві особливості сполуки ДР та СрПв у юнаків та дівчат виявили достовірні розбіжності щодо діагностованої синдромальної картини, рівня тяжкості депресії та власне маніфестних проявів СрПв. Такі синдроми, як істерично-депресивний, депресивно-іпохондричний, депресивно-дисфоричний синдроми зустрічалися лише у дівчат.

Висновки. Значне переважання депресивно-обсесивного та тривожно-депресивного синдромів у юнаків є важливим фактором розвитку СрПв.

Ключові слова: діагностика психічних розладів, депресивні розлади, саморуйнівна поведінка, підлітковий вік.

Вступ

Необхідність ретельного дослідження проявів саморуйнівної поведінки (СрПв) у поєднанні депресивними розладами (ДР) у підлітковому віці є вкрай актуальною для сучасної української психіатрії, насамперед, тому, що молодь є найважливішою складовою нашого суспільного капіталу. Тоді як поширеність депресії зростає у вікових групах підлітків та молоді, а її обтяженість проявами СрПв має значні негативні наслідки для психічного здоров'я та соціальної адаптації в дорослому віці.

За сучасними дослідженнями, поєднання ДР з іншими коморбідними (поведінковими) порушеннями мають найвищий ризик несприятливих наслідків у віці до 24 років (Morales-Muñoz et al., 2023, pp. 218–219). СрПв, а саме суїцидальна поведінка, є основною коморбідною або сукупною чи

вторинною поведінковою патологією, що характерна для підліткового віку в усьому світі (Cantor et al., 2023, pp. 10–12). Зокрема, самогубство є однією з провідних причин смерті серед підлітків, а наявність у них суїцидальних думок і самоушкоджень потенціє підвищений ризик психічних розладів та самогубств у майбутньому (Basta et al., 2023).

У науковій літературі постійну увагу приділяють особливостям перебігу ДР, які пов'язані зі статтю. Вважається, що переважання депресії у жінок є загальним і суттєвим. За сучасними даними, що ґрунтуються на моделі стрес-діатезу, вищий рівень депресії у жінок визначається такими чинниками, як підвищений рівень нейротизму, реактивності на стрес або гіперактивності лімбічної системи (Parker, & Brotchie, 2010, pp. 429–431). Проте поширеність та особливості чоловічої депресії також ретельно вивчаються та обговорюються науковцями (Smith, Mouzon, & Elliott, 2018, pp. 78–89).

Саме тому вивчення клінічних проявів СрПв при ДР у підлітковому та юнацькому віці з урахуванням статевих особливостей є актуальним завданням для науковців.

Методи

На кафедрі психіатрії, психотерапії та медичної психології Національного університету охорони здоров'я України імені П. Л. Шупика (НУОЗУ) у 2023–2024 рр. було проведено дослідження 72 амбулаторних пацієнтів віком 15–18 років, а саме: 19 (26,4 %) юнаків та 53 (73,6 %) дівчини, середній вік яких становив $16,7 \pm 1,8$ року ($M \pm SD$). Критерії включення у дослідження, окрім вікових меж: симптоми ДР відповідно до критеріїв Міжнародної класифікації хвороб для статистики смертності та захворюваності 10-го перегляду (МКХ-10), а також високий бал (≥ 15) за опитувальником здоров'я пацієнта (RHQ-9). Критерії виключення з дослідження: наявність у минулому або в теперішньому психотичних епізодів; органічні розлади головного мозку з проявами інтелектуально-мнестичного зниження; вживання психоактивних речовин протягом останніх 3 міс.

Із діагностичною метою виявлення психопатологічної симптоматики, фіксування ознак СрПв та їхніх особливостей щодо статі в дослідженні було використано напівструктуроване клінічне інтерв'ю та оцінено рівень депресії пацієнтів за допомогою RHQ-9. Дослідження проводили з дотриманням етики, захисту прав та конфіденційності учасників відповідно до рекомендацій комісії з біоетики НУОЗУ.

Статистичний аналіз отриманих даних проводили за допомогою програми IBM SPSS Statistics. Значення між двома групами (розподіл за статтю) порівнювали за допомогою Хі-квадрат-тесту.

Результати

У 50 пацієнтів (69,44 %) віком до 15–17 років було діагностовано депресивний розлад поведінки (ДПР, F92.0). Серед 22 пацієнтів (30,56 %) віком 18 років було діагностовано: 14 дистимію (F34.1) у 14 випадках (63,6 %), а великий депресивний епізод (F32.1-2) – у 8 випадках (36,4 %). Значущих статевих відмінностей у нозологічному розподілі виявлено не було.

Важливі дані були отримані під час аналізу розподілу обстежених пацієнтів за провідним клінічним синдромом відповідно до статі (табл. 1).

Таблиця 1

Розподіл обстежених хворих за провідним клінічним синдромом, абс. (%)

Клінічні синдроми	Всього, n=72	Юнаки, n=19	Дівчата, n=53	χ^2 -test, p
Істеро-депресивний	20 (27,8)	-	20 (37,7)	-
Депресивний	14 (19,4)	5 (26,3)	9 (17)	0,3777
Депресивно-обсесивний	13 (18,1)	9 (47,4)	4 (7,5)	0,0001
Депресивно-деперсоналізаційний / дереалізаційний	11 (15,3)	2 (10,5)	9 (17,0)	0,5022
Тривожно-депресивний	6 (8,3)	3 (21,1)	3 (5,7)	0,052
Депресивно-іпохондричний	4 (5,6)	-	4 (7,5)	-
Депресивно-дисфоричний	4 (5,6)	-	4 (7,5)	-

Істерично-депресивний (зустрічався найчастіше – майже у третини всіх випадків в обох групах), депресивно-іпохондричний, депресивно-дисфоричний синдроми було виявлено тільки у дівчат. Тоді як серед юнаків достовірно переважали випадки депресивно-обсесивного синдрому ($p = 0,000$). Важким варіантом ДР є коморбідне обтяження депресивного синдрому із синдромом деперсоналізації-дереалізації, яке часто є ускладненням саме істеро-депресивної синдрому за механізмом дисоціації. У нашому дослідженні сукупність випадків з істеро-депресивним та депресивно-деперсоналізаційно-дереалізаційним синдромами виявлено у 29 дівчат (54,7 % у цій групі), а у хлопців – лише в 2 випадках (10,5 %) з депресивно-деперсоналізаційно-дереалізаційним синдромом як обтяження важкої депресії ($p = 0,001$).

За результатами визначення рівня депресії за шкалою PHQ-9 у середньому було зафіксовано $20,13 \pm 3,49$ та $14,94 \pm 4,90$ балів ($Me \pm SD$) у дівчат та юнаків, відповідно. Дослідження засвідчило наявність значущих статевих відмінностей у рівні тяжкості депресії (табл. 2) з достовірної перевагою тяжкого рівня депресії серед дівчат.

Таблиця 2

Розподіл обстежених хворих за рівнем депресії за PHQ-9, абс. (%)

Рівень депресії за PHQ-9 (бали)	Всього, n=72	Юнаки, n=19	Дівчата, n=53	χ^2 -test, p
Тяжка депресія ($\geq 20-27$)	45 (62,5)	5 (26,3)	40 (75,5)	0,0001*
Середній ступень тяжкості ($\geq 15-19$)	27 (37,5)	14 (73,7)	13 (24,5)	0,0001*

Наявність різних проявів СрПв було виявлено в усіх пацієнтів під час діагностування ті чи інші прояви СрПв (табл. 3).

Таблиця 3

Розподіл обстежених хворих за діагностованими проявами СрПв, абс. (%)

Варіанти СрПв	Всього, n=72	Юнаки, n=19	Дівчата, n=53	χ^2 -test, p
Несуїцидальні самопорізи, екскоріації	46 (63,9)	7 (36,8)	39 (73,6)	0,0042
Суїцидальні думки	37 (51,4)	9 (47,4)	28 (52,8)	0,6827
Суїцидальна спроба	13 (18,1)	-	13 (24,5)	-
Стійкі суїцидальні тенденції	10 (13,9)	4 (21,1)	6 (11,3)	0,2926
Суїцидальні фантазії	9 (12,5)	4 (21,1)	5 (9,4)	0,1888
Неодноразові суїцидальні спроби	8 (11,1)	2 (10,5)	6 (11,3)	0,9246

Зазвичай ДР супроводжувалися зовнішніми формами СрПв, а саме: несуїцидальними самопорізами чи екскоріаціями, які достовірно майже вдвічі переважали у дівчат ($p = 0,0042$). В усіх випадках катінгу або екскоріацій пацієнти зазначали одночасну наявність періодичних суїцидальних думок чи стійких суїцидальних тенденцій на вістрі ДР.

Усі інші прояви СрПв не мали статистичної різниці в групах за статтю. Але серед юнаків переважали стійкі суїцидальні тенденції та суїцидальні фантазії, а серед дівчат – суїцидальні думки та неодноразові суїцидальні спроби. Також випадки з одноразовою реалізацією суїцидальної спроби було виявлено тільки серед дівчат.

Важливим було те, що в більшості випадках в обох групах прояви СрПв мали зустрічалися у різних поєднаннях, що свідчило про наявність патодинаміки в її розвитку. Це важливо враховувати при розробці комплексних терапевтичних програм.

Дискусія і висновки

Відповідно до результатів проведеного дослідження можна стверджувати, що в юнацькому віці ДР мають 100-відсоткову коморбідність із СрПв. Дані щодо діагностованих провідних клінічних синдромів у групах засвідчили, що істерично-депресивний, депресивно-іпохондричний, депресивно-дисфоричний виявили тільки у дівчат з домінуванням серед них істерично-депресивної симптоматики. Сукупність випадків істеро-депресивного та депресивно-деперсоналізаційно-дереалізаційного синдромів як важкого варіанта ДР істотно частіше зустрічалася серед дівчат. Тоді як для юнаків більш характерним було формування депресивно-обсесивного та тривожно-депресивного синдромів.

Було виявлено значні статеві відмінності в рівні тяжкості депресії та проявів СрПв. Найчастіше ДР поєднувалися з несуїцидальними самопорізами чи екскоріаціями, які достовірно переважали у дівчат.

Аналіз вивчених клінічних випадків засвідчив критичну значущість сімейної історії у формуванні важких варіантів ДР в юнацькому віці, а саме, наявність девіантних дитячо-батьківських відносин, численних психотравм на тлі булінгу в родині та школі.

Отримані дані є важливим результатом до подальшого вивчення та формування відповідних фокусів для комплексного психофармакологічного та психотерапевтичного втручання при ДР в юнацькому віці.

Внесок авторів: Галина Пилягіна – концептуалізація, методологія, рецензування та редагування. Богдан Пуховський – проведення дослідження, курація даних, статистичний аналіз, написання.

Список використаних джерел

- Basta, M., Skourti, E., Simos, P., Soumaki, E., Li, Y., Gerostergios, G., Samiotakis, G., Dafermos, V., Drakaki, M., Papadakis, N., & Vgontzas, A.N. (2023). Associations between sleep complaints, suicidal ideation and depressive symptoms among adolescents and young adults in Greece. *Journal of sleep research*, 32(5), e13900. <https://doi.org/10.1111/jsr.13900>
- Cantor, N., Kingsbury, M., Warner, E., Landry, H., Clayborne, Z., Islam, R., & Colman, I. (2023). Young Adult Outcomes Associated With Adolescent Suicidality: A Meta-analysis. *Pediatrics*, 151(3), e2022058113. <https://doi.org/10.1542/peds.2022-058113>
- Morales-Muñoz, I., Mallikarjun, P.K., Chandan, J.S., Thayakaran, R., Upthegrove, R., & Marwaha, S. (2023). Impact of anxiety and depression across childhood and adolescence on adverse outcomes in young adulthood: a UK birth cohort study. *The British journal of psychiatry : the journal of mental science*, 222(5), 212–220. <https://doi.org/10.1192/bjp.2023.23>
- Parker, G., & Brotchie, H. (2010). Gender differences in depression. *International review of psychiatry (Abingdon, England)*, 22(5), 429–436. <https://doi.org/10.3109/09540261.2010.492391>
- Smith, D.T., Mouzon, D.M., & Elliott, M. (2018). Reviewing the Assumptions About Men's Mental Health: An Exploration of the Gender Binary. *American journal of men's health*, 12(1), 78–89. <https://doi.org/10.1177/1557988316630953>

References

- Basta, M., Skourti, E., Simos, P., Soumaki, E., Li, Y., Gerostergios, G., Samiotakis, G., Dafermos, V., Drakaki, M., Papadakis, N., & Vgontzas, A.N. (2023). Associations between sleep complaints, suicidal ideation and depressive symptoms among adolescents and young adults in Greece. *Journal of sleep research*, 32(5), e13900. <https://doi.org/10.1111/jsr.13900>
- Cantor, N., Kingsbury, M., Warner, E., Landry, H., Clayborne, Z., Islam, R., & Colman, I. (2023). Young Adult Outcomes Associated With Adolescent Suicidality: A Meta-analysis. *Pediatrics*, 151(3), e2022058113. <https://doi.org/10.1542/peds.2022-058113>
- Morales-Muñoz, I., Mallikarjun, P.K., Chandan, J.S., Thayakaran, R., Upthegrove, R., & Marwaha, S. (2023). Impact of anxiety and depression across childhood and adolescence on adverse outcomes in young adulthood: a UK birth cohort study. *The British journal of psychiatry : the journal of mental science*, 222(5), 212–220. <https://doi.org/10.1192/bjp.2023.23>
- Parker, G., & Brotchie, H. (2010). Gender differences in depression. *International review of psychiatry (Abingdon, England)*, 22(5), 429–436. <https://doi.org/10.3109/09540261.2010.492391>
- Smith, D.T., Mouzon, D.M., & Elliott, M. (2018). Reviewing the Assumptions About Men's Mental Health: An Exploration of the Gender Binary. *American journal of men's health*, 12(1), 78–89. <https://doi.org/10.1177/1557988316630953>

Отримано редакцією збірника / Received: 09.09.24

Прорецензовано / Revised: 19.09.24

Схвалено до друку / Accepted: 23.10.24

Galyna PYLIAGINA, DSc (Med.), Prof.

ORCID ID: 0000-0003-0169-1256

e-mail: gpil.doctor@gmail.com

Shupyk National Healthcare University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Bohdan PUKHOVSKYI, PhD Student

ORCID ID: 0009-0003-4652-669X

e-mail: bohdan.puhovskiy@gmail.com

Shupyk National Healthcare University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

SELF-DESTRUCTIVE BEHAVIOR IN DEPRESSIVE DISORDERS IN ADOLESCENCE

Introduction. *Today, there is a tendency to increase the suicide and self-harm rate in depressive disorders (DD) in adolescence and young adulthood. The comorbid combination of self-destructive behaviour (SDB) and DD in adolescence is one of the most important and global problems of modern clinical psychiatry.*

Methods. *The main reasons include chronic social stress associated with war, problems of violence in the family and school, low neuropsychological stability of children and youth, etc.*

Results. *According to the results of the study, it has been proven that in youth DD have 100 % comorbidity with SDB. Sex-specific features of the DD and SDB in boys and girls revealed significant differences in the diagnosed syndromic picture, the severity of depression, and the actual manifestations of SDB. Such syndromes as hysterical-depressive, depressive-hypochondriac, depressive-dysphoric syndrome were found only in girls. The presented results demonstrated severe DD in youth, taking into account gender characteristics.*

Conclusions. *The significant predominance of depressive-obsessive and anxiety-depressive syndromes in young men is an important factor in the development of SDB.*

Keywords: *diagnostics of mental disorders, depressive disorders, self-destructive behaviour, adolescence.*

Автори Г. Пилягіна та Б. Пуховський заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors G. Pyliagina and B. Pukhovsky declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

Наукове видання

**МЕДИЧНА ФІЗИКА –
СУЧАСНИЙ СТАН, ПРОБЛЕМИ,
ШЛЯХИ РОЗВИТКУ
НОВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ**

Науковий збірник

Випуск 11

За матеріалами
XI Міжнародної конференції
(Київ, 25–27 вересня, 2024)

**Редактор Л. Львова
Технічний редактор Г. Пластуненко**

Оригінал-макет виготовлено ВПЦ "Київський університет"



**Формат 70x100^{1/16}. Обл.-вид. арк. 26,0. Ум. друк. арк. 32,9. Наклад 100. Зам. № 224-11199.
Гарнітура Times New Roman. Папір офсетний. Друк офсетний. Вид. № РБ1.
Підписано до друку 23.12.24**

**Видавець і виготовлювач
ВПЦ "Київський університет"**

**Б-р Тараса Шевченка, 14, м. Київ, 01601, Україна
☎ (38044) 239 32 22; (38044) 239 31 58; (38044) 239 31 28
e-mail: vpc@knu.ua; vpc_div.chief@univ.net.ua; redaktor@univ.net.ua
http: vpc.knu.ua**

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1103 від 31.10.02