

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
імені ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

**Тугай Андрій Васильович**



УДК 582.28:614.876

**ВПЛИВ ХРОНІЧНОГО ОПРОМІНЕННЯ НА ҐРУНТОВІ  
МІКРОМЦЕТИ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ АЕС**

03.00.01 – радіобіологія

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата біологічних наук

Київ — 2016

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано на кафедрі екології та охорони навколишнього середовища ННЦ «Інститут біології» Київського національного університету імені Тараса Шевченка МОН України

**Науковий керівник:** доктор біологічних наук, професор  
**Лукашов Дмитро Володимирович**,  
Київський національний університет  
імені Тараса Шевченка МОН України,  
завідувач кафедри екології та охорони  
навколишнього середовища

**Офіційні опоненти:** доктор біологічних наук, професор,  
академік НААН України  
**Гудков Ігор Миколайович**,  
Національний університет біоресурсів і  
природокористування МОН України, завідувач  
кафедри радіобіології та радіоекології

доктор біологічних наук  
**Дружина Микола Олександрович**,  
Інститут експериментальної патології, онкології і  
радіобіології ім. Р.Є. Кавецького НАН України,  
старший науковий співробітник відділу біологічних  
ефектів іонізуючого та неіонізуючого випромінювань

Захист відбудеться « 31 » жовтня 2016 р. о 16 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.001.24 Київського національного університету імені Тараса Шевченка за адресою: м. Київ, просп. Академіка Глушкова, 2, ННЦ «Інститут біології», ауд. 434.

Поштова адреса: 01601, м. Київ, вул. Володимирська, 64/13, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, ННЦ «Інститут біології», спеціалізована вчена рада Д 26.001.24.

З дисертацією можна ознайомитись у Науковій бібліотеці ім. М. Максимовича Київського національного університету імені Тараса Шевченка за адресою: м. Київ, вул. Володимирська 58.

Автореферат розіслано « 28 » вересня 2016 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради



Н.Г. Ракша

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність роботи.** Внаслідок Чорнобильської катастрофи у ґрунти Зони відчуження ЧАЕС потрапило  $3 \times 10^{19}$  Бк [В.Ye. Paton et al., 2003] радіонуклідів, з яких і досі дозоутворюючими залишаються  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{238-240}\text{Pu}$  та  $^{241}\text{Am}$ , що перетворило її на один із найбільших у світі полігонів для дослідження наслідків дії хронічного опромінення на біоту.

Мікобіота є постійною і активною компонентою біогеоценозу та виконує функції регулятора переміщення радіонуклідів, зокрема, у лісових біогеоценозах [R. Avila et al., 1999]. Ґрунтові гриби – це важлива ланка багатьох трофічних ланцюгів, а їхня частка у мікробній біомасі ґрунту сягає 80% [Н.Д. Ананьева и др., 2006]. У попередніх дослідженнях, при вивченні механізмів адаптації ґрунтових мікроміцетів до дії хронічного іонізуючого опромінення, у 80% мікроміцетів було виявлено не відомі раніше радіоадаптивні властивості, які проявлялися у спрямованому рості до джерел іонізуючого випромінювання та стимуляції ростових процесів за дії великих (160 Гр/доб) доз опромінення, здатності обростати паливні частинки чорнобильського походження, колонізувати уранові частинки, переводити деякі радіонукліди, що входять до їх складу, у біологічно доступні форми [Н.Н. Жданова. и др., 1994; Т.И. Тугай и др., 2003, 2007, 2008, 2011, 2014; J. Dighton et al., 2004].

Для мікроміцетів характерна швидка зміна генерацій, що робить їх зручною моделлю для вивчення ефектів хронічного опромінення у низці генерацій, встановлення прямих та віддалених ефектів хронічного опромінення у представників видів мікроміцетів різної екологічної спеціалізації, що часто зустрічались у Зоні відчуження. Досліджені мікроміцети є продуцентами цілої низки біологічно активних сполук, актуальним є встановлення умов хронічного опромінення, за яких відбувається активізація їх росту, що може бути використано при розробленні способів підвищення синтезу таких сполук.

Нині накопичено значний експериментальний матеріал з вивчення ефектів хронічного опромінення у кількох генераціях рослинних об'єктів, комах, ракоподібних, мишоподібних гризунів [И.С. Федотов и др., 2002; А.И. Таскаев и др., 2010; М.І. Гуца, 2015; F. Alonzo et al., 2008; S. Massarin et al., 2010]. Проте, практично відсутні дані щодо віддалених наслідків впливу хронічного опромінення на мікроміцети, зокрема, з радіоадаптивними властивостями.

Встановлення реакцій-відповідей ґрунтових мікроміцетів, які зазнають впливу хронічного опромінення упродовж багатьох генерацій, дає можливість прогнозувати віддалені наслідки опромінення для мікроміцетів з подальшим моделюванням видового та функціонального складу ґрунтових біоценозів. Незважаючи на значний обсяг цих досліджень слід ще з'ясувати наступні питання: які адаптаційні процеси сформувались у пострадіаційних генерацій мікроміцетів та можливі механізми реалізації їх завдяки особливостям функціонування ферментативного складника їхньої антиоксидантної системи.

У зв'язку з накопиченням трансуранових елементів у ґрунті, зокрема, у складі паливних частинок чорнобильського походження, з високою

радіотоксичністю і доволі тривалим періодом напіврозпаду багатьох радіонуклідів, актуальним є вивчення шляхів регуляції потоків плутонію, америцію та інших актиноїдів у трофічних ланцюгах. Великого значення набуває виявлення внеску мікобіоти, особливо опромінених генерацій мікроміцетів, у переведення радіонуклідів, що входять до складу паливних частинок, зокрема, такого високотоксичного елемента як  $^{241}\text{Am}$ , який не має природних стабільних аналогів, у біологічно доступну форму, здатну акумулюватися різними представниками біоти.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Роботу виконано на кафедрі екології та охорони навколишнього середовища ННЦ «Інститут біології» Київського національного університету імені Тараса Шевченка у рамках науково-дослідної теми «Моніторинг, охорона та корекція природних, трансформованих і модельних екосистем з метою збереження біорізноманіття та підвищення їх стійкості до змін довкілля» (Д/Р № 0114U003470, 2014–2015 рр.). Частина досліджень виконано в Інституті мікробіології та вірусології НАНУ у рамках науково-дослідної теми «Дослідження фізіолого-біохімічного і генетичного біорізноманіття та біосинтетичної здатності мікроорганізмів різних систематичних груп» (Д/Р № 0115U004130, 2011–2015 рр.). Моделювання радіоактивного опромінення проводили на базі Інституту ядерних досліджень НАН України.

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи було охарактеризувати дію хронічного опромінення на пострадіаційні генерації ґрунтових мікроміцетів у модельних умовах, що імітують рівні забруднення ґрунту Зони відчуження та оцінити здатність *Cladosporium cladosporioides* переводити радіонукліди, які входять до складу паливних частинок з високою активністю  $^{241}\text{Am}$ , у біологічно доступну форму та накопичувати їх у біомасі мікроміцета.

Для досягнення мети досліджень було поставлено наступні завдання:

1. Встановити вплив хронічного іонізуючого опромінення на виживаність ґрунтових мікроміцетів у модельних умовах для визначення діапазону малих доз для них.

2. Дослідити швидкість радіального росту штамів *Aspergillus versicolor*, *Hormoconis resinae*, *C. cladosporioides* та *Paecilomyces lilacinus* у трьох пострадіаційних генераціях за дії малих доз.

3. Оцінити активність ферментів антиоксидантного захисту (супероксиддисмутази, каталази та пероксидази) за дії малих доз у досліджуваних штамів мікроміцетів.

4. Визначити здатність *C. cladosporioides* переводити радіонукліди, які входять до складу паливних частинок з високою активністю  $^{241}\text{Am}$  у біологічно доступну форму та накопичувати їх у біомасі мікроміцета.

**Об'єкт дослідження:** дія хронічного опромінення на ґрунтові мікроміцети.

**Предмет дослідження:** виживаність опромінених штамів мікроміцетів, ріст та активність ферментів антиоксидантного захисту за дії малих доз, здатність переводити у біологічно доступну форму радіонукліди з паливних «гарячих частинок» з високою активністю  $^{241}\text{Am}$ .

**Методи дослідження:** радіобіологічні (створення адаптованої модельної установки для вивчення впливу хронічного опромінення та отримання пострадіаційних генерацій; характеристика паливних частинок та визначення здатності мікроміцетів переводити частину радіонуклідів, що входять до їх складу, у біологічно доступні форми); мікробіологічні (культивування мікроміцетів та дослідження їхніх властивостей); біохімічні (визначення активності ферментів антиоксидантного захисту мікроміцетів), математичної статистики (оброблення та аналізування отриманих результатів).

**Наукова новизна одержаних результатів.** Встановлено, що іонізуюче опромінення у діапазоні від 6 – 18 Гр обумовлює виникнення у досліджуваних мікроміцетів ефектів, що властиві малим дозам. Уперше отримано дані щодо характеру адаптації у трьох пострадіаційних генераціях чотирьох видів мікроміцетів різних екологічних груп, що дає змогу прогнозувати екологічні наслідки радіоактивного забруднення довкілля. Уперше виявлено різні тенденції у характері змін у пострадіаційних генерацій мікроміцетів на певних етапах онтогенезу. Показано, що збільшення швидкості радіального росту більш виражене у пострадіаційних генераціях контрольних штамів, в той час як більш виражені зміни у функціонуванні антиоксидантної системи виявлено у пострадіаційних генерацій штамів мікроміцетів з радіоадаптивними властивостями. Уперше встановлено, що особливості функціонування антиоксидантних ферментів пострадіаційних генерацій є видоспецифічними. Гормезисні ефекти проявлялись у підвищенні пероксидазної та супероксиддисмутазної (СОД) активності у *C. cladosporioides*, каталазної та пероксидазної – у *H. resinae*, каталазної та СОД активності в *A. versicolor* і *P. lilasinus*. Уперше виявлено часткове руйнування паливних «гарячих частинок» з високою активністю <sup>241</sup>Am штамом *C. cladosporioides* 4061, що супроводжувалось перетворенням частини радіонуклідів у біологічно доступні форми та накопиченням у біомасі мікроміцета. Швидкість накопичення мікроміцетом <sup>241</sup>Am перевищувала швидкість накопичення <sup>137</sup>Cs не зважаючи на те, що активність останнього у складі «гарячих частинок» була у 7 – 10 разів вищою.

**Практичне значення одержаних результатів.** Отримані дані, які у сукупності виявили гормезисний ефект у пострадіаційних генераціях чотирьох видів мікроміцетів, є проявом віддалених наслідків дії хронічного опромінення на мікобіоту, і можуть бути використані при формуванні довгострокових прогнозів щодо трансформації ґрунтових мікробіоценозів Зони відчуження. Виявлену активізацію росту пострадіаційних генерацій *H. resinae* (у кілька разів) слід враховувати за оцінки ризиків, які можуть зростати, у зв'язку з тим, що цей вид спричиняє біодеструкцію авіаційного пального та є причинним агентом корозії. Встановлення умов, за яких виявлено активізацію росту та збільшення активності ферментів антиоксидантного захисту у досліджених мікроміцетів, що є продуцентами цілої низки біологічно активних сполук, може бути використано при розробленні способів підвищення їх синтезу.

Практичне значення отриманих даних щодо здатності *C. cladosporioides* акумулювати <sup>241</sup>Am полягає у перспективі використання їх у біотехнологіях, пов'язаних як з додатковою ремедіацією забруднених територій, так і для деструкції радіоактивних матеріалів (відходів) і перетворення їх на форму, що спрощує подальшу утилізацію. Отримані в роботі дані може бути використано у радіоекології, мікології, екології та впроваджено в навчальний процес у курсі лекцій з мікології, мікробіології та радіаційної мікробіології у Відкритому міжнародному університеті розвитку людини «Україна».

**Особистий внесок здобувача.** Дисертація є самостійною роботою автора. Здобувачем проведено експериментальні дослідження, проаналізовано наукову літературу з цієї проблеми, узагальнено отримані експериментальні дані, проведено порівняльний аналіз з опублікованими в літературі даними. Автором особисто проведено опромінення вихідних штамів мікроміцетів та отримано відповідні генерації, досліджено ростові та фізіолого-біохімічні властивості генерацій мікроміцетів та взаємодію мікроміцета з «гарячими частинками». Вибір теми дисертаційної роботи, постановка мети, планування напрямків досліджень та узагальнення результатів проведено спільно з науковим керівником. Усі дослідження зі створення модельної установки для вивчення впливу хронічного опромінення на пострадіаційні генерації мікроміцетів, характеристики «гарячих частинок» виконано спільно з д.ф-м.н. В.О. Желтоножським та Л.В. Садовниковим (Інститут ядерних досліджень НАН України) за що автор висловлює щире вдячність. Базою для проведення досліджень була раніше створена у відділі фізіології та систематики мікроміцетів Інституту мікробіології і вірусології ім. Д.К.Заболотного НАН України колекція мікроміцетів, виділених з екоотопів Зони відчуження ЧАЕС з різним рівнем експозиційної дози та колекція штамів з вираженими радіоадаптивними властивостями. Автор висловлює щире вдячність керівнику та співробітникам відділу за можливість проведення досліджень з використанням цих унікальних колекцій та всебічну підтримку роботи.

**Апробація результатів дисертації.** Результати роботи було представлено на: XII, XXIII з'їздах товариства мікробіологів України ім. С.М. Виноградського (Ужгород, 2009, Ялта, 2013); II, III междисциплинарных микологических форумах России (Москва, 2010, 2012); X Українському біохімічному з'їзді (Одеса, 2010); Міжнародній конференції «Радіобіологічні і радіоекологічні аспекти Чорнобильської катастрофи» (Славутич, 2011); Міжнародній конференції «Двадцять п'ять років Чорнобильської катастрофи. Безпека майбутнього» (Київ, 2011); XIII Українському ботанічному з'їзді (Львів, 2011); V, Міжнародній науковій конференції «Молодь та поступ біології» (Львів, 2012, 2013); Междисциплинарной научной конференции «Адаптационные стратегии живых систем», (Новый Свет, Крым, 2012, 2013, 2014); IX з'їзду Українського товариства генетиків і селекціонерів ім. М.І. Вавилова (Алушта, 2012); Міжнародній науковій конференції «Мікробіологія та імунологія – перспективи розвитку в XXI столітті» (Київ, 2014). XX, XXII, XXIII щорічних конференціях Інституту ядерних досліджень (Київ, 2013, 2015, 2016).

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано 21 наукову працю, у тому числі – 6 статей у фахових наукових виданнях (2 статі у наукових міжнародних виданнях та 4 статі у виданнях України, що включені до міжнародних наукометричних баз), 15 тез доповідей у матеріалах вітчизняних та міжнародних наукових конференцій та з'їздів.

**Структура та обсяг дисертації** Дисертаційна робота складається зі вступу, огляду літератури, матеріалів і методів досліджень, 3 розділів власних досліджень з обговоренням і узагальненням отриманих результатів, висновків та списку використаних джерел, що включає 346 найменувань. Дисертація викладена на 171 сторінках містить 45 рисунків і 4 таблиці.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

### Матеріали та методи дослідження

Для дослідження впливу хронічного опромінення на пострадіаційні генерації мікроміцетів були відібрані 8 штамів 4 видів, 4 родів мікроміцетів [*A. versicolor*, *H. resinae*, *C. cladosporioides* та *P. lilacinus*, що були виділені з біотопів за різної потужності експозиційної дози [від фонового рівня 12 -15 мкР/год до 70000 мР/год], які зберігаються у колекції культур відділу фізіології та систематики мікроміцетів Інституту мікробіології і вірусології ім. Д.К.Заболотного НАН України. Свій вибір зупинили на цих видах у зв'язку з тим, що вони часто зустрічались у чорнобильській зоні, проявляли найбільш виражений адаптаційний потенціал по відношенню до великих доз опромінення, відрізнялись за пігментацією.

Для проведення досліджень з вивчення впливу іонізуючого хронічного опромінення на мікроміцети та отримання трьох опромінених генерацій, у співпраці з д.ф.-м.н. В.О. Желтоножський та Л.В.Садовниковим (Інститут ядерних досліджень НАН України) було створено модельну установку, що дала можливість впровадити комбінований (лабораторно–польовий) підхід для дослідження впливу іонізуючого хронічного опромінення, якого зазнавали популяції мікроміцетів, що тривалий час знаходились в ґрунті Зони відчуження ЧАЕС. Було використано відібраний у 2013 р. ґрунт із Зони відчуження (біля с. Янів), що мав наступний кількісний склад за основними радіонуклідами:  $^{137}\text{Cs}$  – 73%,  $^{90}\text{Sr}$  – 36%,  $^{241}\text{Am}$  – 1%. Потужність експозиційної дози на висоті 10 см від поверхні ґрунту становила 3 мР/год.

За допомогою адаптованої модельної системи, було проведено тривалі дослідження за контрольованих умов, у результаті яких було отримано три пострадіаційні генерації мікроміцетів: першу – після опромінення вихідних штамів (з радіоадаптивними властивостями, виділених з Зони відчуження та з територій з фоновим рівнем радіоактивності, що таких властивостей не мали) упродовж 30 діб (поглинута доза 6 Гр); другу – після опромінення штамів першої генерації упродовж 30 діб (поглинута доза 6 Гр); третю – після такого самого опромінення другої генерації (поглинута доза 6 Гр).

Посівним матеріалом у всіх дослідженнях слугувала культура відповідного штаму мікроміцета, вирощена на агаризованому середовищі упродовж 14 діб. Культивування мікроміцетів проводили при  $25 \pm 2^\circ\text{C}$ . Швидкість радіального росту кожного штаму контролювали за вирощування на двох агаризованих живильних середовищах різного складу: оптимальному - найбільш універсальному середовищі, прийнятому в мікологічних дослідженнях, сусло-агарі (СА), та на голодному агарі (ГА), що дало можливість визначити ступінь адаптації досліджених штамів не тільки до хронічного опромінення, а й до дефіциту джерел живлення. Висівали культури за стандартною процедурою, уколом у центр чашки Петрі. Дослідження особливостей функціонування антиоксидантної системи мікроміцетів проводили на рідкому середовищі Чапека, яке містило 20 г/л глюкози. Термін культивування визначався завданнями експерименту. Інокуляцію проводили суспензією конідій з концентрацією  $1 \times 10^6$  кон/мл.

Для визначення швидкості радіального росту ( $K_r$ ) досліджуваних мікроміцетів на агаризованих середовищах кожні 12 год вимірювали їхній діаметр. Швидкості радіального росту визначали за загальновідомими методами [Г.А. Кочкина и др., 1978].

Величину каталазної активності визначали спектрофотометричним методом, суть якого полягає у здатності пероксиду водню утворювати з солями молібдену стійкий забарвлений комплекс [М.А. Королюк и др., 1988].

Величину пероксидазної активності визначали спектрофотометрично [A. Thiagarajan et al., 2008] при довжині хвилі 436 нм, як субстрат використовували АБТС (2,2'-азино-біс(3-етилбензотіазолін-6-сульфонова кислота) в ацетатному буфері, рН 5,5.

Величину активності супероксиддисмутази (СОД) визначали спектрофотометричним методом при довжині хвилі 406 нм за ступенем гальмування реакції окиснення кверцетину [В.А. Костюк и др., 1990].

Вміст білка визначали за методом Бредфорда [M. Bredford, 1976].

Дослідження проведено з використанням двох паливних «гарячих частинок» SL-4 та SL-15, які розміщували або на підложці, або занурювали у рідке середовище Чапека з 1г/л глюкози, на якому проводили культивування *S. cladosporioides* 4061. Експеримент проводили упродовж 60 днів. Надалі окремо відділяли усі компоненти досліджуваної системи: рештки «гарячих частинок», культуральну рідину, міцелій. Гамма-спектроскопічні вимірювання виконували на антикомptonівському спектрометрі з Ge-детектором. Питому активність  $^{90}\text{Sr}$  в пробах визначали на  $\beta$ -спектрометрі «СЄБ-50». Змінені спектри обробляли з використанням модифікованої програми 5Бета + шляхом порівняння зі спектрами стандартних джерел ( $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$  і суми  $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) [В.П. Хоменков 1993].

Отримані в роботі дані оброблені статистично [Л.А. Васильева, 2007] з використанням математичних методів обробки результатів вимірів для малих вибірок з залученням пакетів програм Microsoft Exel та Statistica 6.0.



## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

**Вплив хронічного опромінення на виживаність та швидкість радіального росту опромінених генерацій мікроміцетів.** На першому етапі роботи слід було оцінити вплив хронічного опромінення на виживаність досліджуваних мікроміцетів за умов, в яких отримували опромінені генерації.

Для проведення цих досліджень як вихідні було обрано по два штами кожного з чотирьох видів мікроміцетів: перший – з радіоадаптивними властивостями, виділений з Зони відчуження ЧАЕС та другий – з територій із фоновим рівнем радіоактивності, що не проявляв радіоадаптивних властивостей. Мікроміцети було піддано опроміненню в умовах модельної системи для визначення ефектів впливу на досліджувані гриби загальної дози іонізуючого хронічного опромінення у 18 Гр (рис. 1). Було проведено дослідження виживаності мікроміцетів, які росли на твердому поживному середовищі, через один, два та три місяці опромінення, відповідно.

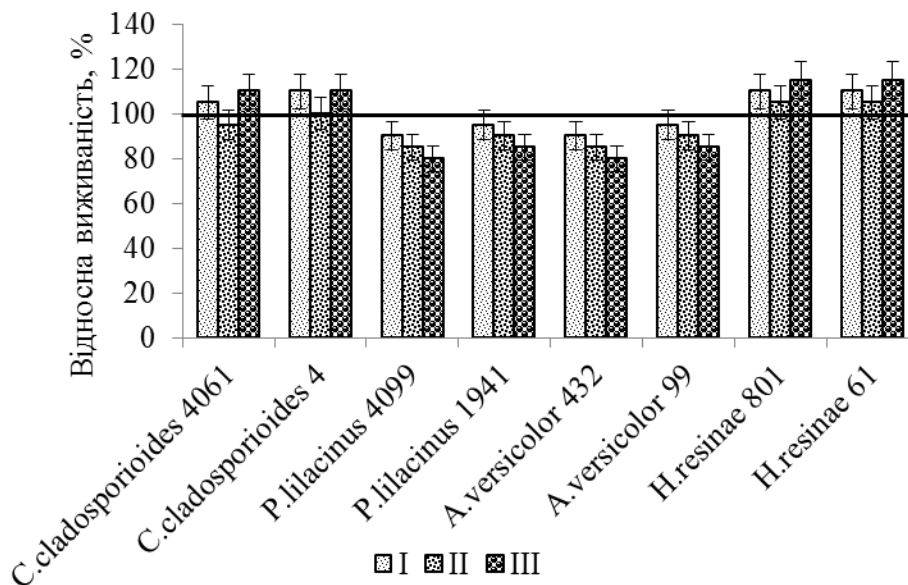


Рис. 1. Відносна виживаність досліджуваних мікроміцетів за дії іонізуючого опромінення упродовж трьох місяців ( $M \pm m$ ;  $n = 4$ ); I – один місяць (6 Гр); II – два місяці (12 Гр); III – три місяці (18 Гр); статистично достовірні зміни при  $p \leq 0,05$

Показано, що при поглинутих дозах опромінення від 6 до 18 Гр у всіх досліджених штамів виявлено коливання частки пророслих конідій. Проте, виявлені зміни у виживаності порівняно з контролем не є статистично значущими, що свідчить про відсутність пригнічуючої дії таких доз опромінення на проростання конідій мікроміцетів.

Отже, встановлено, що за даних умов хронічного опромінення, отримані поглинуті дози в діапазоні від 6 – 18 Гр для досліджуваних мікроміцетів спричиняють ефекти, що відповідають поняттю малих доз. Слід зазначити, що  $LD_{99}$  для цих мікроміцетів перебуває в діапазоні 1000 – 5700 Гр [Н.Н. Жданова,

1988], тобто є на три порядки вищими за виявлений нами діапазон малих доз, що добре узгоджується з визначенням малих доз для певних груп живих організмів.

На другому етапі після встановлення діапазону малих доз було вивчено можливість передачі радіоадаптивних властивостей у низці генерацій досліджуваних мікроскопічних грибів. Дослідження було проведено за порівняння пострадіаційних генерацій штабів чотирьох видів з радіоадаптивними властивостями та контрольних за таким інтегральним показником для грибів, як швидкість радіального росту. Одержані результати представлені на прикладі двох видів [рис. 2).

Встановлено, що гормезисний ефект за критерієм збільшення швидкості радіального росту ( $K_r$ ) є більш вираженим у пострадіаційних генераціях контрольних штабів досліджуваних видів. У генераціях штабів з радіоадаптивними властивостями у темнопігментованих видів *C. cladosporioides* та *H. resinae* – переважно виявлено збільшення  $K_r$ . Найбільш виражені зміни  $K_r$  було виявлено в опромінених генераціях штабів виду *H. resinae*, який є потенційними біодеструкторами авіаційного пального та паливних баків, причинним агентом корозії алюмінієвих конструкцій, продуцентами біологічно активних сполук, зокрема, ферментів та меланінів [V.V. Joutsjoki, 1993; G. San-Blas 1996; A.Y. Itah, 2009].

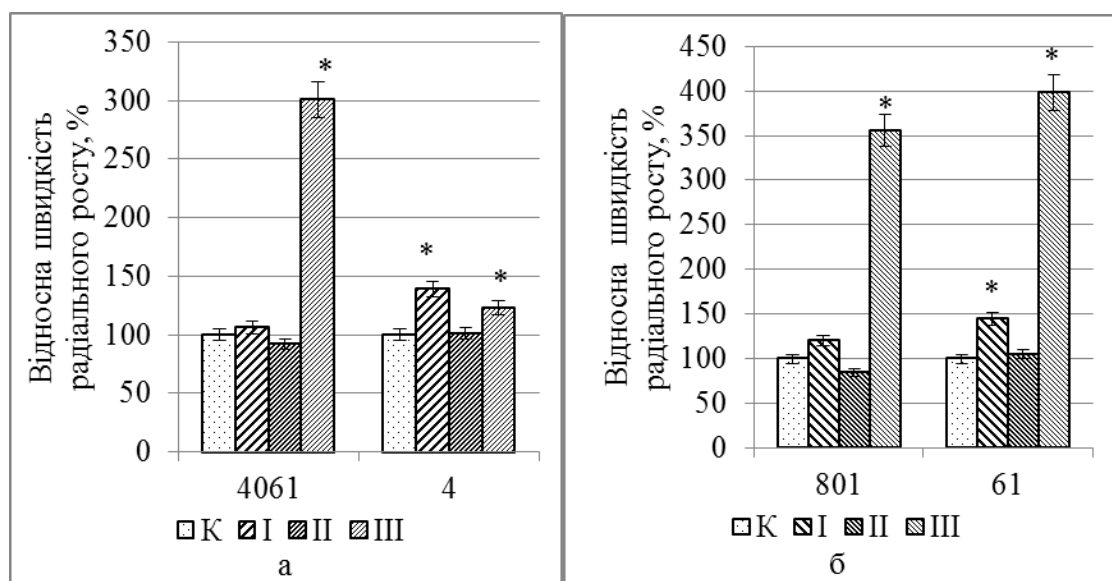


Рис. 2. Відносна швидкість радіального росту опромінених генерацій штабів *Cladosporium cladosporioides* (а) та *Hormoconis resinae* (б), ( $M \pm m$ ;  $n = 15$ ); К – контроль (100%), I – перша генерація; II – друга генерація; III – третя генерація; \* - статистично достовірні зміни при  $p \leq 0,05$

Істотні зміни швидкості радіального росту виявлені у опромінених генераціях *C. cladosporioides*, штами якого проявляють здатність до спрямованого росту та «розпушування» «гарячих частинок» чорнобильського походження, перетворення радіонуклідів, що перебувають у них на іонообмінні рухливі форми [Н.Н. Жданова и др., 1994; N.N. Zhdanova et al., 2004; J. Dighton et al., 2008]. Крім того, цей вид

відомий як продуцент біологічно активних сполук, зокрема, меланінів [Пат. 1523, 71518, 73184; Р.М. Plonka, 2006].

Отримані дані щодо активації росту пострадіаційних генерацій мікроміцетів можуть мати практичне значення при потенційному використанні цих штамів у біотехнологіях, спрямованих на додаткову ремедіацію забруднених об'єктів та синтез біологічно активних сполук.

**Активність антиоксидантних ферментів у генерацій ґрунтових мікроміцетів.** Дослідження впливу хронічного опромінення на функціонування антиоксидантної системи у трьох пострадіаційних генерацій чотирьох видів мікроміцетів було проведено з використанням модельної системи хронічного опромінення. Для всіх досліджених мікроміцетів виявлено видоспецифічні, особливості змін активності основних ферментів антиоксидантного захисту у низці пострадіаційних генерацій.

Значний гормезисний ефект виявлено у трьох генераціях штаму *C. cladosporioides* з радіоадаптивними властивостями – зростання СОД активності (у 2 рази), яке супроводжується зростанням пероксидазної активності (у 4 рази), при цьому практично не виявлено істотних змін каталазної активності (рис. 3).

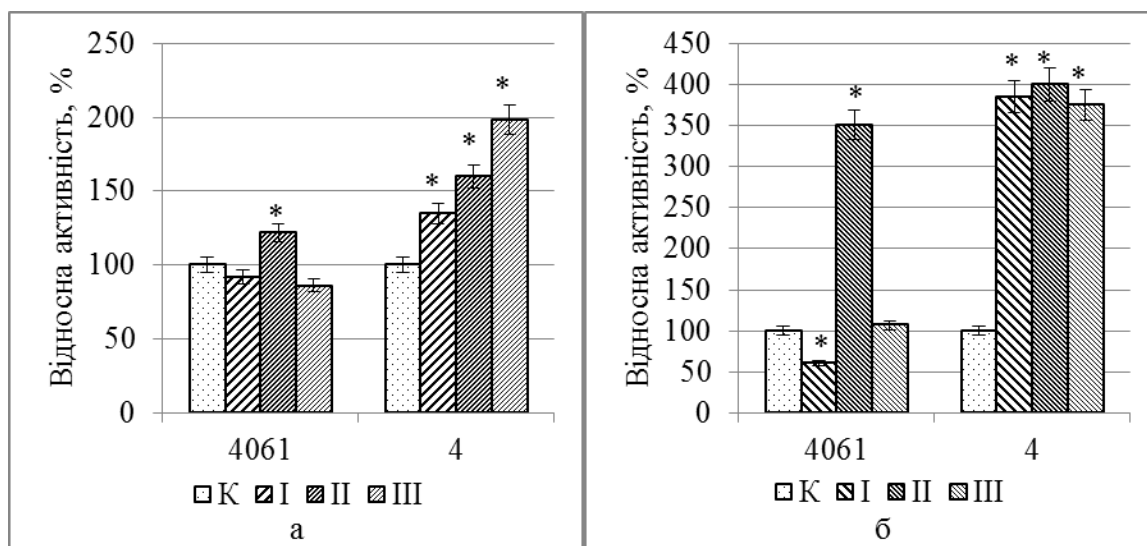


Рис. 3. Супероксиддисмутазна (а) та пероксидазна активності (б) у % трьох опроміnenних генерацій штамів *Cladosporium cladosporioides*, ( $M \pm m$ ;  $n = 4$ ); К – контроль [100%]; I – перша генерація; II – друга генерація; III – третя генерація; \* - статистично достовірні зміни при  $p \leq 0,05$

У пострадіаційних генераціях контрольного штаму *C. cladosporioides* виявлено незначне зростання СОД активності (у 1,2 рази) та істотне підвищення пероксидазної активності (у 3,5 рази) лише у другій генерації. Отже, величина прояву гормезисного ефекту переважала у генераціях штаму з радіоадаптивними властивостями.

У пострадіаційних генераціях штамів виду *Hormoconis resinae* найбільш виражені зміни виявлено для каталазної та пероксидазної активностей (рис. 4).

У всіх пострадіаційних генераціях штаму *H. resinae* з радіоадаптивними властивостями достовірно підвищення активності цих ферментів виявлено у трьох генераціях. На противагу цьому, підвищення каталазної активності виявлено лише у другій генерації контрольного штаму і збільшення пероксидазної активності у третій. У генерацій *H. resinae* на відміну від *C. cladosporioides* зміни СОД активності менш виражені.

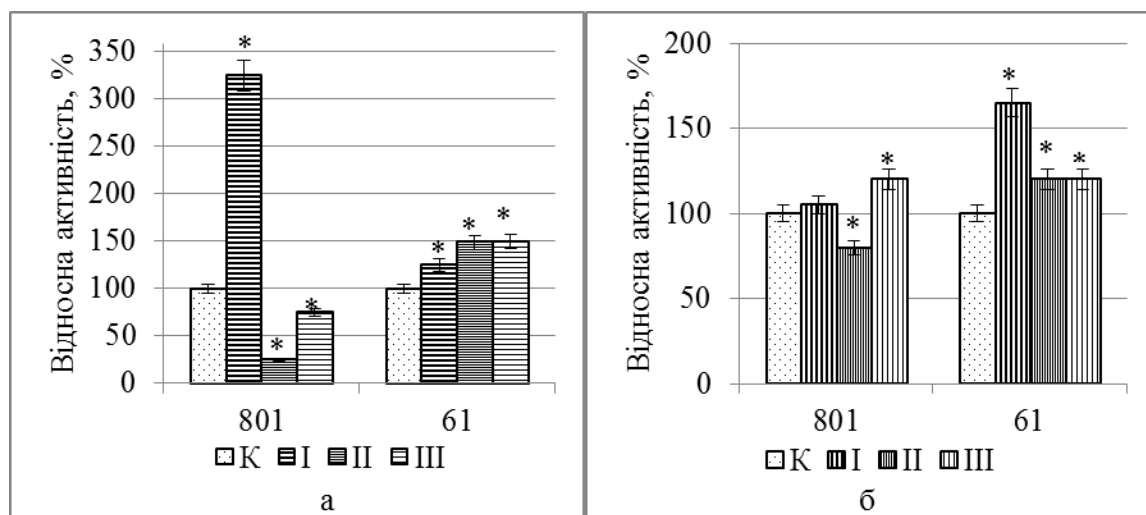


Рис. 4. Каталазна (а) та пероксидазна активності (б) у % трьох опромінених генерацій штамів *Hormoconis resinae*, ( $M \pm m$ ;  $n = 4$ ); К – контроль (100%); I – перша генерація; II – друга генерація; III – третя генерація; \* - статистично достовірні зміни при  $p \leq 0,05$

У *P. lilacinus* найбільш виражені зміни у досліджених генераціях виявлено у СОД активності, які корелювали зі змінами для каталазної активності. Встановлено, що найбільші відмінності СОД активності у *P. lilacinus* виявлено у першій та третій генераціях штаму з радіоадаптивними властивостями та контрольного, при цьому вони мали обернену спрямованість (рис. 5). Виявлено також різноспрямовані зміни каталазної активності у всіх трьох генераціях обох штамів, найбільш виражені у першій та третій.

Найменші зміни у генераціях цього виду виявлено для пероксидазної активності, достовірні відмінності виявлено лише у першій генерації штаму з радіоадаптивними властивостями та контрольного. При цьому вони мали різноспрямований характер.

В результаті аналізу характеру змін СОД активності у пострадіаційних генераціях *A. versicolor* обох батьківських штамів з радіоадаптивними властивостями та контрольного, на противагу генераціям інших видів, було виявлено подібну нелінійну зміну цього показника (рис. 6).

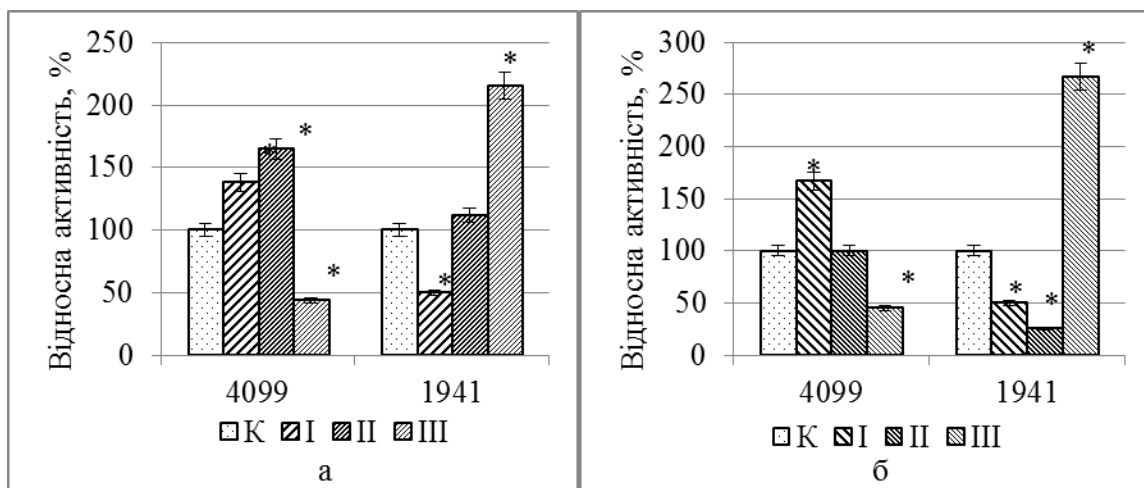


Рис. 5. Супероксиддисмутазна (а) та каталазна активності (б) у трьох опромінених генерацій штамів *Paecilomyces lilacinus*, ( $M \pm m$ ;  $n = 4$ ); К – контроль (100%); I – перша генерація; II – друга генерація; III – третя генерація; \* - статистично достовірні зміни при  $p \leq 0,05$

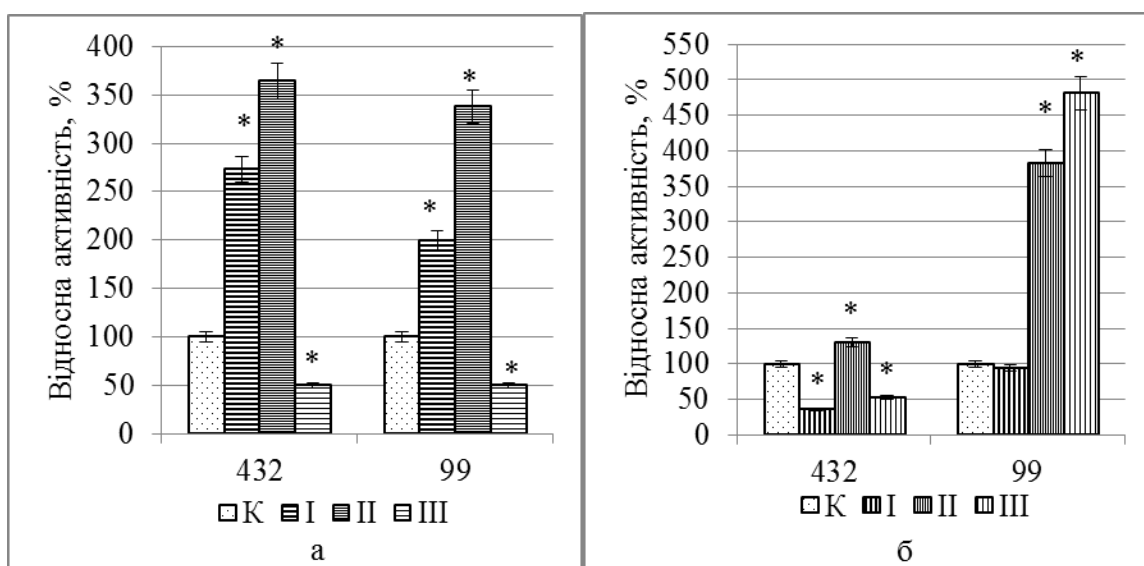


Рис. 6. Супероксиддисмутазна (а) та каталазна активності (б) у трьох опромінених генерацій штамів *Aspergillus versicolor*, ( $M \pm m$ ;  $n = 4$ ); К – контроль (100%); I – перша генерація; II – друга генерація; III – третя генерація; \* - статистично достовірні зміни при  $p \leq 0,05$

Істотний гормезисний ефект виявлено за показниками каталазної активності лише у пострадіаційних генераціях штаму *A. versicolor* з радіоадаптивними властивостями. Крім того, у другій пострадіаційній генерації обох штамів виявлено значне (у 9 разів) зростання пероксидазної активності.

У літературі підвищення пероксидазної активності у грибів пов'язують зі збільшенням, як фітопатогенних так і патогенних для людини властивостей, а сприйнятливість до дії активних форм кисню (джерелом яких може бути іонізуюче випромінювання), зокрема, пероксиду водню, є певним маркером ступеню їх прояву

[Mir A. et al., 2015]. Виявлене збільшення пероксидазної активності у пострадіаційних генерацій *A. versicolor* слід враховувати, при оцінці ризиків, які викликає цей мікроміцет, виходячи з того, що він є постійним контамінантом вологих закритих приміщень та може приводити до руйнування конструкційних матеріалів та до цілої низки алергічних захворювань людини, продукувати мікотоксини [Д.А. Васильев, 2008; К.А. Дарбинян, 2014; J. Jussila, 2002; D. Benndorf, 2008; I.A. Dzalamidze, 2015].

Виявлені значні гормезисні ефекти за показниками збільшення активності ферментів антиоксидантного захисту пострадіаційних генерацій досліджуваних видів, що свідчить про суттєву роль цієї системи у адаптації мікроміцетів до дії хронічного іонізуючого опромінення, проте у кожного з досліджених видів є особливості у її функціонуванні. Встановлено, що не існує універсальних механізмів адаптації у пострадіаційних генераціях досліджуваних мікроміцетів, а вони є специфічними для кожного певного виду. При цьому виявлено певні ознаки наслідування адаптивних властивостей у пострадіаційних генерацій мікроміцетів. Встановлено, що зміни швидкості радіального росту є більш вираженими у пострадіаційних генераціях контрольних штамів. Проте, зміни активності ферментів антиоксидантної системи є більш вираженими у пострадіаційних генерацій штамів з радіоадаптивними властивостями, що виділені із радіоактивно забруднених територій. Порівнюючи зміни у генераціях різних видів на рівні організму за швидкістю радіального росту та активністю антиоксидантних ферментів було встановлено, що варіабельність досліджуваних параметрів більше виражена на внутрішньоклітинному рівні, що і забезпечує високий рівень адаптації до хронічного опромінення у досліджуваних мікроміцетів.

**Здатність *C. cladosporioides* переводити радіонукліди, які входять до складу паливних частинок у біологічно доступну форму.** Останнім часом накопичено дані щодо перевищення швидкості вертикальної міграції  $^{241}\text{Am}$  у ґрунтовому профілі порівняно до теоретично розрахованих величин, які базувалися на фізико-хімічних властивостях його сполук [М.Д. Бондарьков и др., 2003, 2006; М.В. Желтоножская 2008; А.И. Липская и др., 2012]. Було зроблено припущення, що такі зміни у швидкості перенесення цього радіонукліда відбуваються за участі ґрунтових мікроміцетів, які можуть сприяти переведенню  $^{241}\text{Am}$  зі складу «гарячих частинок» у біологічно доступні форми. Це припущення базувалось на літературних даних щодо здатності низки видів мікроміцетів, зокрема *C. cladosporioides* до деструкції паливних частинок різного радіонуклідного складу, що призводило до «розпушування» останніх і подальшого розчинення [Н.Н. Жданова и др., 1991, 1994; N.N. Zhdanova et al., 2003]. Для певних видів мікроміцетів при цьому було виявлено здатність акумулювати  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{152}\text{Eu}$ . Проте, в літературі відсутні дані щодо здатності мікроміцетів накопичувати  $^{241}\text{Am}$ .

Задачою цієї частини досліджень було вивчення здатності *C. cladosporioides* 4061 трансформувати паливні «гарячі частинки» з високою активністю  $\alpha$ -

випромінювання  $^{241}\text{Am}$ . Для проведення досліджень співробітниками лабораторії, що очолює проф. В.О. Желтоножський (Інститут ядерних досліджень НАНУ) відібрано два типи «гарячих частинок» (SL-15 та SL-4) та проведено визначення їх активності.

Було встановлено, що в частинці SL-15 абсолютна активність  $^{241}\text{Am}$  становила 364 Бк,  $^{137}\text{Cs}$  – 3420 Бк, а відносний вклад активності певних радіонуклідів –  $^{137}\text{Cs}$  – 59%,  $^{90}\text{Sr}$  – 35%,  $^{241}\text{Am}$  – 6%. У другій частинці SL-4 активність  $^{241}\text{Am}$  становила 908 Бк,  $^{137}\text{Cs}$  – 6590 Бк. Відносний вклад активності окремих радіонуклідів у «гарячій частинці» SL-4 –  $^{137}\text{Cs}$  – 58%,  $^{90}\text{Sr}$  – 35%,  $^{241}\text{Am}$  – 7%.

Отже, загальна активність «гарячої частинки» SL-4 майже вдвічі перевищує активність «гарячої частинки» SL-15. При цьому співвідношення  $^{241}\text{Am}$  та  $^{137}\text{Cs}$  в них є подібним, у SL-4 активність  $^{137}\text{Cs}$  вища за таку  $^{241}\text{Am}$  приблизно у 7, а у SL-15 майже у 10 разів, тобто в обох цих «гарячих частинках» активність  $^{137}\text{Cs}$  майже на порядок вища за таку  $^{241}\text{Am}$ .

Було зроблено припущення, що мікроміцети здатні переводити радіонукліди з «гарячих частинок» на біологічно доступну форму, яка може знаходитися або в культуральній рідині, або в біомасі грибів. Для перевірки здатності безпосереднього накопичування мікроміцетами радіонуклідів провели дослідження активності культуральної рідини. Показано, що майже відсутній значущий перехід  $^{241}\text{Am}$  у культуральне середовище та виявлено незначний вихід  $^{137}\text{Cs}$  як з частинки зануреної у рідину, так і з поверхнево розташованої (рис. 7).

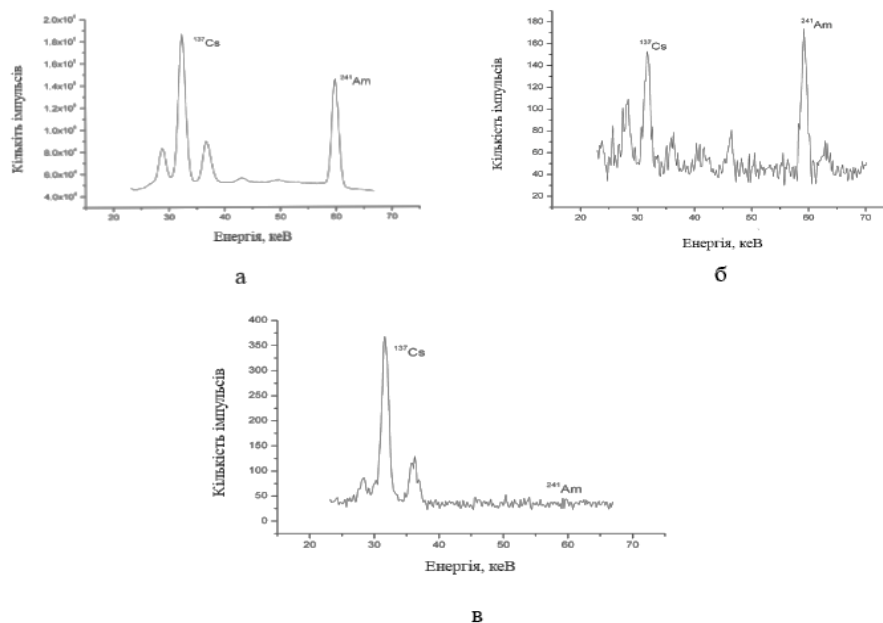


Рис. 7. Фрагмент спектру характеристичного  $\gamma$ - випромінювання в низько енергетичній області на напівпровідниковому спектрометрі «гарячої частинки» SL-15 (а), грибної біомаси *Cladosporium cladosporioides* 4061 (б), культуральної рідини (в)

Аналіз  $\beta$ -спектрів культуральної рідини також не вияв переведення  $^{90}\text{Sr}$  у рідку фазу як за поверхневого, так і зануреного розташування «гарячих частинок».

У грибній біомасі в результаті акумуляції радіонуклідів з «гарячої частинки» SL-15 розрахована активність становила для  $^{241}\text{Am}$  – 0,165 Бк та для  $^{137}\text{Cs}$  – 0,465 Бк, а з «гарячої» частинки SL-4 - активність  $^{241}\text{Am}$  в біомасі становила – 0,36 Бк, та  $^{137}\text{Cs}$  – 1,8 Бк. Аналіз  $\beta$ -спектрів не вияв достовірного накопичення  $^{90}\text{Sr}$  у біомасі досліджуваного мікроміцета.

Таким чином встановлено, що незважаючи на те, що до складу досліджуваних «гарячих частинках» входило три радіонукліди  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  та  $^{241}\text{Am}$  у біомасі було виявлено лише два з них. Було розраховано акумульовану активність  $^{241}\text{Am}$  та  $^{137}\text{Cs}$  на одиницю маси *C. cladosporioides* 4061 (табл. 1).

Таблиця 1

**Акумуляція радіонуклідів *C. cladosporioides* при культивуванні на рідкому поживному середовищі з «гарячими частинками» ( $M \pm m$ ;  $n = 3$ )**

Розташування «гарячої» частинки	Акумуляція радіонуклідів Бк/г	
	$^{137}\text{Cs}$	$^{241}\text{Am}$
Поверхнєве SL-15	28 $\pm$ 1,4	9 $\pm$ 0,5
Занурене SL-4	236 $\pm$ 12	47 $\pm$ 2,4

Слід зазначити, що не виявлено кореляції між активністю радіонуклідів  $^{241}\text{Am}$  та  $^{137}\text{Cs}$  у «гарячих частинках» та у грибній біомасі *C. cladosporioides*.

Отже, вперше встановлено здатність мікроміцетів *C. cladosporioides* 4061 накопичувати  $^{241}\text{Am}$  зі складу «гарячих частинок». Показано, що америцій практично не переходив до культуральної рідини, що дає змогу стверджувати про відсутність його розчинної форми. Слід зазначити, що швидкість накопичення мікроміцетом  $^{241}\text{Am}$  перевищувала швидкість накопичення мікроміцетом  $^{137}\text{Cs}$  незважаючи на те, що його активність у «гарячих частинках» була вищою у 7 – 10 разів.

## ВИСНОВКИ

Роботу присвячено одному з актуальних питань радіобіології – дослідженню віддалених наслідків впливу хронічного іонізуючого опромінення на живі організми. Із застосуванням методів радіобіології, мікробіології та біохімії, одержані нові результати щодо пострадіаційних гормезисних ефектів у пострадіаційних генераціях чотирьох видів ґрунтових мікроміцетів, що проявлялись у зміні швидкості радіального росту та активності антиоксидантних ферментів. Виявлена здатність *Cladosporium cladosporioides* до переведення частини радіонуклідів з паливних частинок з високою активністю  $^{241}\text{Am}$  у біологічно доступні форми, які накопичувались у біомасі мікроміцета.



1. За виживаністю мікроміцетів видів *Aspergillus versicolor*, *Hormoconis resinae*, *Cladosporium cladosporioides* та *Paecilomyces lilacinus* обґрунтовано розширення поняття малих доз хронічного опромінення для ґрунтових грибів, що відповідає діапазону 6 – 18 Гр.

2. Уперше, у трьох пострадіаційних генераціях штаму *C. cladosporioides* з фонові території (за умов хронічного опромінення кожної генерації у дозі 6 Гр/міс) виявлено гормезисний ефект, який проявлявся у збільшенні швидкості радіального росту у 3 рази. При цьому для генерацій штаму з території Зони відчуження ЧАЕС зміни у швидкості радіального росту не характерні. Для пострадіаційних генерацій штамів *H. resinae* незалежно від походження за умов хронічного опромінення проявлялися гормезисні ефекти у вигляді 3,6–4 - разового збільшення швидкості радіального росту.

3. Показано, що адаптивні властивості штаму *C. cladosporioides* з території Зони відчуження ЧАЕС пов'язані зі зростанням СОД активності у 2 рази у трьох пострадіаційних генераціях та підвищенням у 4 рази пероксидазної активності у всіх трьох генераціях. У опромінених генераціях штаму з фонових територій виявлено підвищення тільки пероксидазної активності у другій пострадіаційній генерації.

4. Виявлено, що у *H. resinae* адаптація до хронічного опромінення проявлялася у достовірному підвищенні каталазної та пероксидазної активностей у всіх пострадіаційних генераціях штаму із Зони відчуження та у першій і третій генераціях штаму з фонових територій.

5. Показано, що одним з пострадіаційних ефектів у опромінених генераціях *A. versicolor* та *P. lilacinus* є підвищення СОД активності у 3,6 та 2,7 рази та у зростанні каталазної активності у 2,5 та 4,5 рази, відповідно.

6. Виявлено істотні різноспрямовані зміни пероксидазної активності у пострадіаційних генераціях штамів *A.versicolor*: зменшення у 9 разів у першій та третій генераціях обох штамів та підвищення у 9 та 2,5 рази у другій генерації штаму з радіоактивно забрудненої та фонові території, відповідно.

7. Уперше встановлено, що *C. cladosporioides* спричиняв переведення частини радіонуклідів з паливних «гарячих» частинок з високим вмістом  $^{241}\text{Am}$  у біологічно доступні форми, які накопичувались у біомасі мікроміцета. При цьому в біомасі не виявлено  $^{90}\text{Sr}$ , а швидкість накопичення  $^{241}\text{Am}$  перевищувала швидкість накопичення  $^{137}\text{Cs}$ , не зважаючи на те, що активність останнього у складі «гарячих частинок» була у 7 – 10 разів вищою.

### СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙ

1. Tugay A. V. Effects of ionizing radiation on the antioxidant system of microscopic fungi with radioadaptive properties found in the Chernobyl exclusion zone / T. I. Tugay, M. V. Zheltonozhskaya, L. V. Sadovnikov, A. V. Tugay, E. B. Farfan // Health Physics - Radiation Safety Journal. – 2011. – Vol. 101, № 4. – P. 375 – 382. (Особистий внесок здобувача – проведення експерименту, статистичне оброблення результатів, підготовка матеріалів до друку).

2. Тугай А. В. Закономірності впливу низьких доз опромінення на мікроскопічні гриби / Т. І. Тугай, А. В. Тугай, М. В. Желтоножська, Л. В. Садовников // Ядерна фізика та енергетика. — 2012. — Т.13, № 4. — С. 396 — 402. (Особистий внесок здобувача — проведення експерименту, статистичне оброблення результатів, підготовка матеріалів до друку).
3. Тугай А. В. Влияние низких доз облучения на рост *Aspergillus versicolor* и *Raecilomyces lilacinus* / Т. И. Тугай, А. В. Тугай, М. В. Желтоножская, Л. В. Садовников // Мікробіол. журн. — 2013. — Т. 75, № 4. — С. 33 — 40. (Особистий внесок здобувача — проведення експерименту, статистичне оброблення результатів, підготовка матеріалів до друку).
4. Tugay A. Effect of Light Wavelengths and Coherence on Growth, Enzymes Activity, and Melanin Accumulation of Liquid-Cultured *Inonotus obliquus* [Ach.:Pers.] Pilát / N. Poyedinok, O. Mykhaylova, T. Tugay, A. Tugay, A. Negriyko, I. Dudka // Appl. Biochem. Biotechnol. — 2015. — Vol. 176. — P. 333 — 343. (Особистий внесок здобувача — проведення експерименту, статистичне оброблення результатів, підготовка матеріалів до друку).
5. Тугай А. В. Особенности ростовых процессов и функционирования антиоксидантной системы у трех поколений облученных популяций микромицетов *Hormoconis resinae* / А. В. Тугай, Т. И. Тугай, В. А. Желтоножский, М. В. Желтоножская, Л. В. Садовников // Ядерная физика и энергетика. — 2015. — Т. 16, № 4. — С. 408 — 414. (Особистий внесок здобувача — проведення експерименту, статистичне оброблення результатів, підготовка матеріалів до друку).
6. Тугай А. Вплив хронічного опромінення на фізіолого-біохімічні властивості трьох опромінених «поколінь» *Aspergillus versicolor* / А. Тугай, Т. Тугай, Д. Лукашов // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. — 2015. — Т. 70, №2. — С. 77 — 81. (Особистий внесок здобувача — проведення експерименту, статистичне оброблення результатів, підготовка матеріалів до друку)].
7. Тугай А. В. Фізіолого-біохімічні властивості першого і другого поколінь штамів *Hormoconis resinae*, які зазнали впливу хронічного опромінення низької інтенсивності в модельних умовах / Т. І. Тугай, О. В. Табанова, А. В. Тугай // XII з'їзд товариства мікробіологів України ім. С.М.Виноградського, 25–30 трав. 2009 р.: матер. конфер. — Ужгород, 2009. — С. 138.
8. Тугай А. В. Влияние ионизирующего излучения в низких дозах на *Cladosporium cladosporioides* [Fres.] de Vries / Т. И. Тугай, А. В. Тугай, И. Н. Гамалий, Т. Ю. Бойко // II междисциплинарный микологический форум: «Имунопатология. Аллергология. Инфектология», 14 — 15 апр. 2010 г.: матер. конфер. — Москва, 2010. — С. 230–231.
9. Тугай А. В. Особливості функціонування антиоксидантної системи першого покоління опромінених штамів *Cladosporium cladosporioides* та *Raecilomyces lilacinus* / Т. І. Тугай, А. В. Тугай, І. М. Гамалій, Т. Ю. Бойко // X Український

- біохімічний з'їзд, 13 – 17 вер. 2010 р.: матер. конфер. – Одеса, 2010. – С. 315 – 316.
10. Тугай А. В. Порівняльне дослідження функціонування антиоксидантної системи у двох поколіннях світлопигментованих видів *Aspergillus versicolor* та *Raecilomyces lilacinus* чорнобильського походження / Т. Ю. Бойко, А. В. Тугай, Т. І. Тугай // Міжнародна конференція «Радіобіологічні і радіоекологічні аспекти Чорнобильської катастрофи», 11 – 15 квіт. 2011 р.: матер. конфер. – Славутич, 2011. – С. 61.
  11. Тугай А. В. Адаптация микроскопических грибов Чернобыльского происхождения к хроническому ионизирующему излучению / Т. И. Тугай, В. А. Желтоножский, М. В. Желтоножская, Л. В. Садовников, А. В. Тугай, М. В. Лиждвой // Міжнародна конференція «Двадцять п'ять років Чорнобильської катастрофи. Безпека майбутнього», 21 – 22 квіт. 2011 р.: матер. конфер. – Київ, 2011. – С. 142–143.
  12. Тугай А. В. Біологічна активність мікроскопічних грибів з радіоадаптивними властивостями / А. В. Тугай, М. В. Лиждвой, Т. І. Тугай // XIII з'їзд Українського ботанічного товариства, 19 – 23 вер. 2011 р.: матер. конфер. – Львів, 2011. – С. 330.
  13. Тугай А. В. Дослідження впливу хронічного іонізуючого опромінення на ферментативну антиоксидантну систему у мікроміцетів родів *Aspergillus* і *Cladosporium* / К. С. Карпюк, Ю. П. Громик, Т. І. Тугай, А. В. Тугай // V Міжнародна наукова конференція студентів та аспірантів «Молодь та поступ біології», 3 – 6 квіт. 2012 р.: матер. конфер. – Львів, 2012. – С. 166–167.
  14. Тугай А. В. Адаптация микроскопических грибов к хроническому ионизирующему излучению / Т. И. Тугай, А. В. Тугай, М. В. Лиждвой // Междисциплинарная научная конференция "Адаптационные стратегии живых систем", 11 – 16 июня 2012 г.: матер. конфер. – Новый Свет, Крым, Украина, 2012. – С. 505.
  15. Тугай А. В. Особенности функционирования системы антиоксидантной защиты у ряда поколений *Hormoconis resinae* / Т. И. Тугай, А. В. Тугай, В. А. Желтоножский, М. В. Желтоножская, Л. В. Садовников // XX щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень, 28 січ.– 1 лют. 2013 р.: матер. конфер. – Київ, 2013. – С. 150.
  16. Тугай А. В. Порівняльне дослідження пероксидазної активності *Cladosporium cladosporioides* у різні проміжки часу після опромінення / А. В. Тугай, Т. І. Тугай // XIII з'їзд товариства мікробіологів України ім. С.М. Виноградського, 1 – 6 жовт. 2013 р.: матер. конфер. – Ялта, 2013. – С. 428.
  17. Tugay A. V. Adaptive strategy in relation to chronic radiation at some generation of *Aspergillus versicolor* with radioadaptive properties / Т. І. Tugay, А. V. Tugay // Interdisciplinary Scientific Conference "Adaptation strategies of the living systems", 12 – 17 May 2014 у.: матер. конфер. – Київ, 2014. – С. 82.

18. Тугай А. В. Моделирование процессов радиотропизма и радиостимуляции у микроскопических грибов / Т. И. Тугай, В. А. Желтоножский, М. В. Желтоножская, А. В. Тугай // Международная научная конференция «Радиобиология: антропогенные излучения», 25 – 26 сент. 2014 г.: матер. конфер. – Гомель, 2014. – С. 189.
19. Тугай А. В. Отдаленные последствия воздействия хронического облучения на микроскопические грибы / А. В. Тугай, Т. И. Тугай, В. А. Желтоножский, // VII Съезд по радиационным исследованиям [радиобиология, радиоэкология, радиационная безопасность], 21 – 24 окт. 2014 г.: матер. конфер. – Москва, 2014. – С. 59
20. Тугай А. В. Особливості росту та функціонування системи антиоксидантного захисту у ряд генерацій *Aspergillus versicolor* / А. В. Тугай, Т. І. Тугай, В. О. Желтоножський, М. В. Желтоножська, Л. В. Садовніков // XXII щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень, 26 – 30 січ. 2015 р.: матер. конфер. – Київ, 2015. – С. 185.
21. Tugay A. V. Decomposing radioactive hot particles found in the Chernobyl exclusion zone by microscopic fungi *Cladosporium cladosporioides* / Т. І. Tugay, V. A. Zheltonozhsky, М. V. Zheltonozhskaya, A.V. Tugay, L.V. Sadovnikov // XXIII щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень, 01 – 05 лют. 2016 р.: матер. конфер. – Київ, 2016. – С. 194.

### АНОТАЦІЯ

#### **Тугай А.В. Вплив хронічного опромінення на ґрунтові мікроміцети Зони відчуження Чорнобильської АЕС. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата біологічних наук за спеціальністю 03.00.01 – радіобіологія. – Київський національний університет імені Тараса Шевченка Міністерства освіти і науки України, Київ, 2016.

Дисертаційна робота присвячена вивченню віддалених наслідків дії хронічного опромінення на пострадіаційні генерації мікроміцетів, отримані в модельних умовах, які імітують рівні забруднення ґрунту Зони відчуження ЧАЕС.

Встановлено, що сумарна поглинута доза 18 Гр при хронічному іонізуючому опроміненні упродовж 3 місяців не впливає на виживаність досліджених мікроміцетів, тобто свідчить про їх толерантність та є джерелом малих доз для них.

Показано, що збільшення швидкості радіального росту більш виражене у пострадіаційних генерацій контрольних штамів, а зростання активності антиоксидантних ферментів у пострадіаційних генераціях штамів з радіоадаптивними властивостями.

Виявлена *C. cladosporioides* переводити радіонукліди, які входять до складу паливних частинок з високою активністю  $^{241}\text{Am}$ , у біологічно доступну форму та накопичувати їх у біомасі мікроміцета.

**Ключові слова:** хронічне опромінення, мікроміцети, пострадіаційні генерації, швидкість радіального росту, антиоксидантні ферменти, накопичення  $^{241}\text{Am}$ .

## АННОТАЦИЯ

**Тугай А.В. Влияние хронического облучения на почвенные микромицеты Зоны отчуждения Чернобыльской АЭС. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук по специальности 03.00.01 – радиобиология. – Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко Министерства образования и науки Украины, Киев, 2016.

Диссертационная работа посвящена изучению отдаленных последствий действия хронического облучения на пострадиационные генерации микромицетов, полученные в модельных условиях.

Была создана модельная система, применяя комбинированный [лабораторно - полевой] подход, имитирующая текущий уровень радионуклидного загрязнения почвы Зоны отчуждения ЧАЭС [отбор почвы поблизости с. Янев]. Используя эту модельную систему, установлено, что ионизирующее облучение в диапазоне от 6 – 18 Гр обуславливает возникновение в исследуемых микромицетах эффекты, вызываемые малыми дозами. В модельных условиях были получены три пострадиационные генерации 4 видов микромицетов, выделенных из Зоны отчуждения и проявляющих радиоадаптивные свойства и штаммов этих же видов, выделенных на территориях с фоновым уровнем радиоактивности и не устойчивых к высоким дозам радиации. Сравнительный анализ изменений, возникших в пострадиационных генерациях, по критерию скорости радиального роста и активности антиоксидантных ферментов позволил выявить ранее не известные, тенденции. Изменения по параметру скорости радиального роста более выражены в пострадиационных генерациях контрольных штаммов, в сравнении с такими генераций штаммов с радиоадаптивными свойствами, что свидетельствует о разных адаптационных свойствах. Гормезисный эффект по критерию скорости радиального роста более выражен у меланинсодержащих видов по сравнению со светлопигментированными видами. Наиболее выраженный гормезисный эффект выявлен в пострадиационных генерациях *Hormoconis resinae*, что необходимо учитывать при оценке рисков, исходя из того, что этот вид известен как «керосиновый» гриб, который растет на различных видах жидких топливных материалов, вызывает коррозию топливных баков.

В пострадиационных генерациях исследованных видов микромицетов более выражены изменения скорости радиального роста по сравнению с эффектами у родительских штаммов, при непосредственном действии облучения, что свидетельствует о сформировавшейся у них адаптации к хроническому облучению.

Показано, что изменения в активности антиоксидантных ферментов более выражены в пострадиационных генерациях штаммов с радиоадаптивными свойствами. Впервые выявлены закономерности изменений активности антиоксидантных ферментов, присущие отдельным видам. У *C. cladosporioides* наиболее выраженные гормезисные эффекты проявлялись в повышении пероксидазной и СОД активностей, у *H. resinae* – каталазной и пероксидазной, у

*A. versicolor* и *P. lilasinus* – каталазной и СОД активности, что свидетельствует о том, что каждому виду присуща уникальная адаптационная стратегия. Установлено, что для пострадиационных поколений штаммов *A. versicolor* – вида, являющегося причинным агентом целого ряда заболеваний, продуцента микотоксинов, характерно резкое изменение пероксидазной активности. Этот факт необходимо учитывать при оценке прогнозов об изменении степени патогенности этого вида, которая, как известно, коррелирует с пероксидазной активностью.

Впервые выявлена способность *C. cladosporioides* не только «разрыхлять» топливные частицы с высокой активностью  $^{241}\text{Am}$ , но и частично переводить радионуклиды, находящиеся в них, в биологически доступные формы и аккумулировать их в биомассе микромицета. Способность грибов переводить такой высокотоксичный трансурановый элемент как  $^{241}\text{Am}$  в ионообменные подвижные формы необходимо учитывать при формировании прогнозов отдаленных последствий действия хронического облучения на миграцию радионуклидов.

**Ключевые слова:** хроническое облучение, микромицеты, пострадиационные поколения, скорость радиального роста, антиоксидантные ферменты, аккумуляция  $^{241}\text{Am}$ .

#### ANNOTATION

**Tugay A.V. Effect of Chronic Exposure on Soil Micromycetes of Chernobyl Exclusion Zone. - Manuscript.**

Dissertation for obtaining a scientific degree of Candidate of Biological Sciences under specialization – 03.00.01 – Radiobiology. – Taras Shevchenko National University of Kyiv, the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2016.

The dissertation is dedicated to researching remote effects of chronic exposure on post-radiation generations of micromycetes, which were obtained in model system. This model system imitated the levels of soil contamination of Chernobyl Exclusion Zone.

It was shown that chronic radiation exposure in doses up to 18 Gy (within 3 months) had no influence on the survival of micromycetes, and these doses are small for micromycetes. It was demonstrated that post-radiation generations of control strains had increased radial growth and post-radiation generations with radioadaptive properties had increased the activity of antioxidant enzymes.

It was established that *C. cladosporioides* could transform radionuclides which are part of the fuel particles with high activity  $^{241}\text{Am}$  in biologically available form.

**Key words:** chronic radiation, micromycetes, post radiation generation, radial growth rate, antioxidant enzymes, uptake of  $^{241}\text{Am}$ .