

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**

ННЦ «Інститут біології та медицини»  
Кафедра екології та зоології

Зав. кафедри к.б.н. Подобайло А.В.  
Протокол №\_\_\_\_ засідання кафедри  
від “\_\_\_\_” \_\_\_\_\_20\_\_ р.

**БІОТЕСТУВАННЯ ТОКСИЧНОСТІ ҐРУНТІВ СЕРЕБРЯНСЬКОГО  
ЛІСНИЦТВА, ЗАБРУДНЕНИХ ВНАСЛІДОК ВОЄННИХ ДІЙ**

Кваліфікаційна робота бакалавра  
денної форми навчання  
за спеціальністю 101 Екологія  
Багнія Петра Степановича  
Науковий керівник від кафедри  
к.б.н., ас. Ляшенко В.А.

Оцінка захисту роботи

---

**Київ – 2025 р.**

## АНОТАЦІЯ

Ґрунт є найскладнішою та найбільш комплексною складовою екосистем. Він надає середовище проживання для однієї четвертої частини усього описаного біорізноманіття. На сьогодні не є встановленим точний вплив на довкілля деяких боєприпасів, що використовуються в ході бойових дій, зокрема під час повномасштабного вторгнення росії в Україну.

Метою даної роботи була оцінка якісних та кількісних проявів токсичного ефекту ґрунтових проб зібраних з воронки від 152-мм артилерійського снаряду. Матеріалом слугували ґрунтові проби з воронки, утвореної від вибуху 152-мм артилерійського боєприпасу в Серебрянському лісництві. Дослідження було проведено за допомогою стандартних методів біотестування на рослинних-тест об'єктах. За результатами дослідження було встановлено незначне зниження проростання насінини салату посівного (*Lactuca sativa L.*), виявлено негативний вплив на показники росту тест-об'єкту в зразках ґрунту з глибин 60 та 90 см.

Кваліфікаційна робота викладена на 50 сторінках, наведено 7 таблиць та 9 рисунків. Список джерел включає 43 роботи.

Результати роботи апробовано на XXII Міжнародній науковій конференції «Шевченківська весна: досягнення в науках про життя / Advancements in Life Sciences» у 2025 році.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b>	4
<b>РОЗДІЛ 1</b> Огляд літератури	6
1.1. Забруднення ґрунтів вибуховими речовинами та важкими металами	6
1.2. Особливості переміщення та акумуляції речовин в ґрунтовому середовищі	8
1.3. Пошкодження та забруднення ґрунтів внаслідок ведення воєнних дій	10
1.4. Актуальність дослідження	12
<b>РОЗДІЛ 2</b> Матеріали та методи їх досліджень	17
2.1. Матеріал дослідження	17
2.2. Проведення дослідження	18
2.3. Статистичний аналіз	20
2.4. Оцінка генотоксичності на основі мікроядерного тесту	23
<b>РОЗДІЛ 3</b> Результати досліджень та їх обговорення	26
3.1. Якісні ознаки негативного впливу	26
3.2. Результати та їх обговорення	28
<b>ВИСНОВКИ</b>	42
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b>	43
<b>ДОДАТКИ</b>	48

## ВСТУП

Ґрунт є найскладнішою та найбільш комплексною складовою екосистем. Він надає середовище проживання для однієї четвертої частини усього описаного біорізноманіття [1].

У другій половині ХХ-століття перші екоотоксикологічні дослідження над ґрунтом розпочалися з спостережень за негативним впливом пестицидів на ґрунтових безхребетних. Згодом, випробування хімічних речовин на токсичність отримали структурованість, запровадивши тестування над окремими видами, модельні екосистеми та польові випробування [2].

Незважаючи на достатню кількість інформації щодо складу вибухових речовин та бойових снарядів, які використовуються під час бойових дій, достеменно є невідомим потенційний вплив від усіх можливих видів озброєння, що використовуються у воєнних конфліктах.

Екологічні наслідки повномасштабного вторгнення росії в Україну є суттєво відчутними. [3]. Розгортання лінії фронту в понад 3 тис. км. сприяло масовому знищенню рослинного та тваринного світу, отруєнню водних ресурсів, забрудненню атмосфери, і загалом вчиненню багатьох злочинів проти екології. Дані дії підпадають під поняття екоцид, яке є офіційно визначеним терміном, і закріплений у статті 441 «Екоцид» Кримінального кодексу України [4-5]. Згідно звітам Державної екологічної інспекції України, станом на 04.11.2024 збройна агресія росії проти України спричинила горіння 3,08 млн. т нафтопродуктів, 86,5 тис. га лісових пожеж, 2,1 тис. т забруднених водних об'єктів, 1,0 млн. м<sup>2</sup> забруднених ґрунтів, 11,4 млн шт знищених та пошкоджених дерев та рослин [6].

Забруднення ґрунтів є важливим питанням, оскільки залишені внаслідок воєнних дій токсичні речовини можуть залишатися в екосистемах тривалий час. Це призводить до зниження родючості ґрунтів, забруднення водойм, потрапляння токсичних речовин в харчовий ланцюг людини. Згідно аналізу супутникових даних МБО «Екологія-Право-Людина» 1 км<sup>2</sup> засіяного поля на

сході України налічує 480 вирв від снаряду калібру 82 мм, 547 вирв від снаряду 120 мм, і 1025 вирв від снаряду 152 мм. В грунтах даної площини сконцентровано щонайменше 50 т заліза, 1 т сполук сірки, 2,35 т міді, а 37% даної поверхні втратило свій родючий шар [7][8]. Значимість пошкоджень ґрунтового шару на сході України пояснюється також і тим, що бойові дії поширюються на зону найбільш родючих ґрунтів країни. Ушкодження шару ґрунту відбувається не лише через вибухи снарядів, але й через ущільнення проходом важкої техніки, і риттям фортифікаційних споруд та окопів [7]. Надмірне ущільнення ґрунту також призводить до значного зниження врожайності, а такі ґрунти набагато складніше відновити.

На сьогодні не є встановленим точний вплив на довкілля деяких боеприпасів, що використовуються в ході бойових дій, зокрема під час повномасштабного вторгнення росії в Україну. Тому **метою даної роботи було** оцінити якісні та кількісні прояви токсичного ефекту ґрунтових проб зібраних з воронки від 152-мм артилерійського снаряду.

Для досягнення мети були сформовані наступні **завдання**:

1. Оцінити токсичний ефект за кількісними ознаками.
2. Оцінити фітотоксичний ефект.
3. Провести статистичну обробку результатів та оцінити наслідки впливу артилерійського снаряду на рослини.

## РОЗДІЛ 1

### ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

#### 1.1. Забруднення ґрунтів вибуховими речовинами та важкими металами

В ході ведення бойових дій забруднення зазнають значні площі сільськогосподарських земель. Війна може спричинити хімічне забруднення внаслідок вибухів, розливу паливно-мастильних матеріалів, пожеж. До речовин, що надходять до ґрунту через вибухи боєприпасів, належать важкі метали та компоненти вибухових речовин [9].

Дана робота зосереджена на впливі артилерійського осколково-фугасного снаряду калібру 152 мм від гаубиці 2А65 Мста-Б та самохідної гаубиці 2С19 Мста-С. Індекс даного снаряду – 3ОФ, з варіаціями 3ОФ-45, 45-1, 45М-1, 64. Розглянутим буде снаряд з індексом 3ОФ-45, зважаючи на поширеність.

Маса снаряду 3ОФ-45 становить 43,56 кг, маса вибухової речовини – 7,65 кг [10]. Швидкість осколків – 2100 м/с, кількість осколків – 6780 од, маса – 4-5,5 г кожен. Максимальна дальність стрільби – 15,2-24,7 км. Температурний діапазон експлуатації – 50°C. Тип вибухівки – підричник РГМ-2М або РГМ-2. Вибухова речовина складається з А-ІХ-2 (гексал), щільність якого становить 1,7 г/см<sup>3</sup>. Гексал є вибуховою сумішшю, що складається з гексогена (циклотриметилентринітраміну) (73%), алюмінієвої пудри (23%), і воску, переважно парафіну або церезину. Другою вибуховою речовиною є тротил (тринітротолуол)  $C_7H_5N_3O_6$ , температура плавлення 80-82°C, температура кипіння, при якій речовина вибухає, становить 240°C. Розчинність у воді 130 мг/л, питома вага 1,5-1,6. В залежності від виду снаряду маса тротилу може становити 5,8 кг для ВОФ-546, ВОФ-546У, і 6,5

кг для ВОФ-32-1. В інших варіаціях снарядів вибуховим елементом виступає А-ХІ-20 або А-ІХ-2 [10-11].

В артилерійському снаряді з тактичними цілями використовується пороховий заряд, що складається з бездимного або нітроцелюлозного пороху [12]. Компонентами бездимного пороху є:

1. Вибухові речовини – нітроцелюлоза, нітрогліцерин, нітрогуанідін [13].
2. Пластифікатори – дибутилфталат, акардит, поліефірний адипат, динітротолуол [13].
3. В'язучі речовини – каніфоль, етилацетат [14].
4. Стабілізатори – дифеніламін, 2-нітродифеніламін, 4-нітродифеніламін, N-нітрозодифеніламін, N-метид-п-нітроанілін [15-16].
5. Розміднювачі – олово та його сполуки, вісмут та його сполуки [13].
6. Полум'ягасні добавки – хлорид калію, нітрат калію та сульфат калію [14].
7. Добавки, що сприяють зменшенню зносу ствола – тальк, віск, оксид титану, поліуретанові оболонки [17].
8. Інші добавки – етилацетат, каніфоль, графіт [14].

Можливі компоненти та їхній вміст в бездимному поросі на прикладі Primex: 0-40% нітрогліцерину, 0-10% дибутилфталату, 0-10% polyester adipate, 0-5% каніфолі, 0-5% етилацетату, 0,3-1,5% дифеніламіну, 0-1,5% N-нітрозодифеніламіну, 0-1,5% 2-нітрофеніламіну, 0-1,5% нітрату калію, 0-1,5% сульфату калію, 0-1,5% оксиду олова, 0,02-1% графіту, 0-1% карбонату кальцію, решта припадає на нітроцелюлозу [32].

Слід зазначити, що в бойових діях беруть використовуються велике різноманіття сортів бездимного пороху, склад яких сильно варіюється. Так, для артилерійських гармат великих калібрів можуть використовуватися піроксилінові пороху з сумішшю піроксиліну або піроколодію [37].

Особливістю бездимного пороху є високий вміст водню та вуглеводнів. За оцінками, третина продуктів горіння в порохових газах складаються оксиди вуглеводнів, таких як: бензен, бензопірен, толуол, тротил, гексоген,

нітрогліцерин [37]. Дані речовини є токсичними, канцерогенними та мутагенними.

Серед інших речовин снаряду є тетрил, який вміщується в бойову частину снаряду РГМ-2 (В-429). Маса тетрилу становить 12,5 г [10].

Швидкість розчинення тротилу при 10°C – 0,0087 мг/хв/см<sup>2</sup>, а гексогену – 0,0013 мг/хв/см<sup>2</sup>. На швидкість розчинення не впливає рН середовища, але збільшення площі поверхні та швидкість змішування. Ці енергетичні матеріали мають дуже низьку розчинність, що призводить до здатності до акумуляції. Таким чином дані речовини не взаємодіють з ґрунтами, і натомість мігрують в біосфері через ґрунтові води. В деяких дослідженнях на військових полігонах США гексоген було знайдено в ґрунтових водах, а тротил – ні. Це пояснюється тим, що тротил проникає в ґрунт не так глибоко, як гексоген. Енергетичні сполуки слабо сублимуються, а їх випаровування незначне [20].

## **1.2. Особливості переміщення та акумуляції речовин в ґрунтовому середовищі**

На переміщення та перетворення речовин в ґрунтовому середовищі впливає значна кількість процесів та зовнішніх факторів. Міграційні та акумуляційні процеси в ґрунтовому середовищі є складними та багатофакторними явищами. Переміщення, або міграція речовин відбувається під впливом різноспрямованих потоків – гравітаційних, еолових, водних, біологічних, біогенних, антропогенних. Також важливими є процеси дифузії та інфільтрації. Основною геохімічною системою, яка сприяє переміщенню речовин в просторі, є водні потоки. Швидкість руху речовин залежить від їхньої активності, розчинності, характеристики ґрунтового середовища [23].

Акумуляція речовин в ґрунтовому середовищі може бути зумовлена їх потраплянням в ґрунт з ґрунтових вод, поверхневого і бокового стоків води. Основний механізм акумуляції відбувається шляхом осадження речовин після випаровування води, що їх транспортує. Акумуляція може бути абсолютною, відносною, а також залишковою. Для локальних ділянок має значення відносна та залишкова акумуляція. Відносною акумуляцією передбачається переміщення речовин з нижніх ґрунтових горизонтів до поверхні за участі рослин. Залишковим є накопичення речовин в ґрунтах при виносі інших, відносно більш рухливих речовин [23]. Така динаміка забруднення свідчить про комплексну поведінку токсичних речовин в екосистемах та необхідність подальших досліджень з моніторингу стану ґрунтів.

Після накопичення речовин в різних ґрунтових горизонтах, вони потрапляють в рослинні організми. Є дослідження, за результатами яких встановлено, що вміст важких металів в ґрунті, порівняно з індустріальними зонами, різко зменшується в зелених зонах [30]. Це підводить до висновку, що значна частка важких металів, і інших потенційно шкідливих речовин, при акумуляції в ґрунтовому середовищі не залишаються в ньому назавжди, а продовжуються мігрувати по малому колу обігу речовин. Частина токсичних речовин не залишається постійно в ґрунтовому середовищі, а бере участь в подальшій міграції до рослин, ґрунтових вод та атмосфери.

Для території досліджуваного ботанічного заказника «Серебрянський» характерні такі типи ґрунтів як: дернові піщані та глинисто-піщані ґрунти, лучні та лучно-чорноземні поверхнево-солонцюваті ґрунти, і карбонатні чорноземні ґрунти [25].

**Дернові піщані ґрунти.** Добре виражений гумусовий горизонт (до 40 см), високий вміст гумусу (до 15%). Характерна висока вбирна ємність. рН слабокислий, нейтральний або слаболужний. Підвищений запас азоту [26-27].

**Лучно-чорноземні ґрунти.** Характерний гумусовий горизонт потужністю 40-80 см, неоглеєний. Перехідний горизонт розтягнутий, сягає глибини від 1,2 до 1,6 м. Гумусу в орному шарі до 6%. рН ґрунтового розчину слабокислий (6,0). Мають достатню енергію нітрифікації, і малу рухомість фосфору. Добре забезпечені вологою [28]. Висока шпаруватість гумусового горизонту, висока водопроникність та водоутримуюча здатність. Верхні горизонти характеризуються високою ємністю катіонного обміну [27].

**Чорноземи типові карбонатні.** Характерною ознакою є товстий гумусовий горизонт (60-120 см). рН ґрунтового розчину нейтральний або слабокислий. Багаті на калій та вуглекислий кальцій [29].

### **1.3. Пошкодження та забруднення ґрунтів внаслідок ведення воєнних дій**

Бойові дії характерні знищенням, ушкодженням та забрудненням довкілля. Основними джерелами забруднення ґрунтового, водного та повітряного середовища є нафтопродукти, важкі метали, вибухові речовини. Окрім забруднення хімічними речовинами, компоненти природного середовища можуть зазнавати ушкоджень іншими способами, які погіршують продуктивні властивості ґрунту.

Так, найбільш деструктивним для ґрунту є механічне пошкодження шляхом ущільнення гумусового шару. Ущільнення ґрунту спричинює порушення водного балансу, транспорту речовин, сприяє розвитку ерозії. Ущільнення та інші види деформацій ґрунтового середовища можуть відбуватися внаслідок будівництва фортифікаційних споруд: окопи, бліндажі, траншеї, сховища, склади тощо. Значного пошкодження структури ґрунт

зазнає від ущільнення внаслідок руху бойової техніки. Рух бойової техніки передбачає переміщення колісної та гусеничної техніки, яка важить десятки тон. Таке механічне пошкодження супроводжується зсувами шарів ґрунту, утворення щільної структури ґрунтових частинок, зменшується проникність води та повітря. Наслідками може бути погіршена адаптація рослин до нестачі вологи, посухи, зниження врожайності. Також, рослини можуть стати фізично неспроможними до проростання в сильно ущільненому ґрунті [37].

Серед механічних видів пошкодження ґрунту в ході бойових дій слід надати увагу утворенню кратерів внаслідок вибуху бойового снаряду. Назва такого виду пошкодження ґрунту – бомбтурбація [38]. Утворені кратери змінюють ландшафти та рельєф, погіршують водний та повітряний режим ґрунту. Характерною ознакою бомбтурбації є перемішування генетичних горизонтів ґрунту. Ущільнення ґрунту може зазнавати також від вібраційного впливу, спричиненого енергетичними імпульсами від детонації боєприпасів, роботи бойової техніки [37].

Вибухи боєприпасів утворюють значну кількість тепла, локально підвищуючи температуру в місці детонації. Такий вплив на ґрунт порушує термічний та водний режим, змінює гранулометричний склад, а також обвуглює ґрунт, залишаючи в кратері згарище [37]. Воєнна агресія росії проти України характерна використанням фосфорних боєприпасів, що споряджені білим фосфором, який є надзвичайно небезпечним для людей та інших організмів [40]. Температура горіння білого фосфору в таких боєприпасах може сягати 2760°C. Було зафіксовано кратери від використання фосфорних боєприпасів в Запорізькій області. Ґрунт в такому кратері зазнав значних пошкоджень: сухість, затвердіння, утворення блокової структури [37].

Загалом, порушення ґрунтового покриву як наслідок ведення воєнних дій можна розділити на первинні, ті що виникають безпосередньо під час воєнних дій, та вторинні – проявляються як наслідок ведення бойових дій. До первинних слід віднести прямі ушкодження ґрунту, хімічне, радіаційне,

фізичне забруднення, тепловий вплив. До вторинних відносять затоплення, засолення, ерозію, вивітрювання, деградацію, дегуміфікацію. Основними наслідками ведення бойових дій для ґрунтів є підвищення концентрації хімічних речовин, засмічення як уламками та непідірваними боєприпасами, так і відходами, зниження або цілковита втрата родючості, втрата або зниження здатності до самоочищення, активація ерозії, заболочування та опустелювання, і, як кінцевий наслідок – втрата біорізноманіття [37].

#### **1.4. Актуальність дослідження**

Дане дослідження має на меті встановити наслідки вибуху 152-мм артилерійського снаряду на групі рослинних об'єктів в штучних умовах. Дослідженням наслідків вибухів різних снарядів досліджувалися, в своїй більшості, в країнах колишнього Радянського Союзу, країнах Європи та США. Такі дослідження передбачали як узагальнений аналіз впливу вибухів від снарядів, так і аналіз конкретних речовин, що містяться в снаряді. Війна на Сході України, розпочата в 2014 році, а також повномасштабне вторгнення росії в Україну в 2022 році сприяли появі великої кількості українських досліджень в сфері забруднення ґрунтів та вод внаслідок бойових дій. Відповідно до даних Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України близько 20% природоохоронних територій України пошкоджено війною, що складає майже 0,9 млн га заповідних зон. Серед них 812 об'єктів природно-заповідного фонду України. Катастрофічної небезпеки зазнають території російської окупації. Так, під контролем російських військ знаходиться 8 заповідників та 10 національних природних парків, що становить 2,9 млн га Смарагдової мережі, які охороняються законодавством Європейського Союзу та Радою Європи [39].

Деякі дослідження пропонують загальний огляд проблеми та її масштабів, надають статистичні дані та рекомендації щодо здійснення запобіжних заходів [3]. Існують дослідження даної проблематики, що охоплюють окремі регіони України. Наприклад, в 2024 році було описано вплив бойових дій на ґрунти Миколаївської області, показавши, що близько 30% земель знаходяться в зоні підвищеної небезпеки, що зумовлено деградацією екосистем від мінування, випалювання землі, ерозії, зсувів та тривалих обстрілів. Перелічені причини механічно та хімічно забруднюють ґрунтові екосистеми, збільшуючи негативний вплив на екосистеми та порушуючи їхню стійкість. Дана робота також містить й експеримент з біотестування з використанням крес-салату та визначанням параметрів енергії проростання, і частки схожості [19].

В Сполучених Штатах Америки вже тривалий час проводяться різноманітні дослідження на військову тематику. Як було вище зазначено, вибухові речовини артилерійських снарядів мають різні властивості, тому, наприклад, існує дослідження, що прояснює властивості тротилу, його особливості трансформації в ґрунті, вплив окисно-відновлюваного потенціалу на тротил. Експеримент полягав в лабораторному тестуванні тротилу в водно-ґрунтовій суспензії [20]. Результати таких досліджень дозволяють встановити вплив речовин в підземних водах та ґрунтах, запобігаючи появі серйозних екологічних проблем. Важливість даних досліджень полягає в отриманні результатів для конкретно встановленої ситуації.

В ході двох світових війн, та незліченної кількості інших військових конфліктів, відбулися значні екологічні катастрофи. Воєнні дії не обмежуються використанням вогнепальної зброї та техніки. Холодна Війна зумовила створення великої кількості небезпечних інструментів знищення. Так, зараз в світі знаходиться близько 100 млн не підірваних протипіхотних мін [31]. В німецькому узбережжі Балтійського моря накопичилося понад

300000 непідірваних боєприпасів. Концентрації вибухових речовин у воді є нижчими за порогові значення токсичності для морської фауни, проте залишаються місця з екстремальними значеннями. В даних пробах води було виявлено тринітротолуол та інші вибухові речовини [33]. Також, в озері міста Жерарме, Франція, досі знаходиться близько 70 тон боєприпасів [34].

Одним з випадків абсолютного та незворотного знищення екосистем є використання дефоліанту «Агент Оранж» американськими військами під час Другої В'єтнамської Війни (1961-1975 рр.). Над лісами В'єтнаму було розприскано близько 44 млн літрів «Агенту Оранж» та 28 млн літрів інших дефоліантів. Ушкоджень зазнали 1,7 млн гектарів гірських та мангрових лісів [31]. Вплив дефоліанту, окрім масового знеліснення, ускладнив відновлення пошкоджених лісів. Так, до нинішнього часу дані лісі досі не відновилися, як і їхнє біорізноманіття, що значно скоротилося в ході ведення війни [35].

Існують випадки екоциду, коли природним екосистемам вдалося повністю відновитися після катастрофічного знищення. Таким випадком є підриг китайськими військами дамби на річці Хуанхе, Китай, під час Другої японсько-китайської війни (1937-1945 рр.). Дамбу було підірвано з метою зупинки просування японських військ, затопивши значну територію. Повінню було вбито, за різними оцінками, від 500 тис до 1 млн місцевих жителів. Родючі землі були затоплені, флора та фауна серйозно постраждала. Катастрофу також посилили значні літні дощі. Згодом дамбу було відновлено, а річку урегульовано. В результаті екологічний стан затоплених територій успішно відновився [36]. Даний випадок демонструє, що в деяких випадках навіть після колосального антропогенного втручання стан екосистеми може відновитися.

Ще одним контroversійним випадком абсолютного знищення екосистем є випробування та застосування ядерної зброї. Використання ядерного озброєння призводить до колосальних руйнувань та жертв. Відомими випадками атаки з застосуванням такої зброї є ядерне бомбардування

Хірошіми та Нагасакі збройними силами США. Наслідками даних актів є близько 210000 жертв серед мирного населення, знищення міст та інфраструктури, а також унеможливлення подальшого проживання в місцях бомбардування [41]. Незважаючи на це, природним ресурсам знищеної та забрудненої території вдалося успішно відновитися за досить короткий термін. Згідно відповідних джерел інформації, в рослин Хірошіми внаслідок вибуху постраждала лише надземна частина, тоді як підземні органи залишились цілими і активно відновлюються. Також, дерева, що росли в декількох сотнях метрах від епіцентру вибуху, хоч і зазнали пошкоджень, проте залишились живими до цих пір. Також згадується, що дрібна навколишня рослинність навколо епіцентру вибуху відновилася екстремально швидко. Така поведінка організмів пояснюється тим, що доза радіації, вивільнена від вибуху ядерної боеголовки, була недостатня для вчинення шкоди рослинам. Незвичним у цій ситуації є також те, що рослини змогли відновитися на тому ґрунті, який зазнав теплового впливу від вибуху, що оцінюється як в 40 разів більшим ніж температура Сонця [42]. Згідно дослідження (Webster et al., 2016) в Чорнобильській зоні відчуження було спостережено неочікувано високу активність та поширення ссавців. Було встановлено активність чотирьох видів хижих ссавців на станціях біля районів з високим рівнем забруднення Cs-137. Встановлено позитивну кореляцію заселення єнотоподібного собаки (*Nyctereutes procyonoides*) та лисиці рудої (*Vulpes vulpes*) з щільністю радіоактивного забруднення. Не виявлено чіткої кореляції між поширенням вовка сірого (*Canis lupus*) та радіоактивним забрудненням. Є припущення, що фактором, який впливає на поширення вовка сірого є людські поселення, а не забруднення. Результатом зазначеного дослідження є встановлення відсутності залежності між тяжкістю радіаційного забруднення та розподілу хижих ссавців [43].

За період ведення бойових дій на Сході України з 2014 р було проведено певну кількість досліджень щодо наявності забруднення важкими металами

територій, що зазнали ушкоджень від бойових дій. Українською громадською організацією Екодія було проведено комплексний аналіз впливу бойових дій на земельні ресурси, а також оцінка рівня пошкодження ґрунтів, їхнього хімічного забруднення, а також наслідки такого впливу [37]. На прикладі Вільхівської сільської територіальної громади Харківської області і Саптанської селищної територіальної громади Донецької області було ідентифіковано місця переміщення бойової техніки, точки активних боїв, обстрілів та бомбтурбацій, а також місця побудови воєнної інфраструктури. Дані території зазнали обстрілів, зокрема, і артилерійськими снарядами калібру 152 мм. Встановлено забруднення ґрунтів хімічними елементами внаслідок бомбтурбації, засмічення території осколками від вибухів та руху військової техніки, а також зафіксовано ущільнення та перепалювання ґрунту. Згідно аналізу було встановлено перевищення показників ГДК та фонових концентрацій переважно свинцю та міді. Також є хімічні елементи, вміст яких перевищує фонове значення в десятки разів, про знаходиться в рамках ГДК. Для досліджуваних територій таким елементом є марганець, вміст якого в ґрунті перевищує фонові концентрації в 25 разів [37]. Таким чином, можна зробити висновок, що збільшення вмісту хімічних речовин в ґрунтового середовищі однозначно може бути наслідком ведення бойових дій. Незважаючи на потенційну шкідливість таких речовин, збільшення їхньої концентрації внаслідок бомбтурбації, або інших видів забруднення, не обов'язково можна розцінювати як забруднення ґрунтового, водного чи повітряного середовища.

Повномасштабне вторгнення росії в Україну має нищівний, системний та довготривалий вплив на екосистеми, ґрунтове, водне та повітряне середовища. Ураження території України відбувається внаслідок безпосередніх бойових дій, а також через застосування важких боєприпасів з великим руйнівним потенціалом та значним вмістом шкідливих речовин. Окупація та бойові дії ставлять під загрозу цілісність екосистем,

біорізноманіття та природного балансу. Відновлення пошкоджених та забруднених територій займатиме десятиліття та значної кількості ресурсів.

## РОЗДІЛ 2

### Матеріали та методи їх досліджень

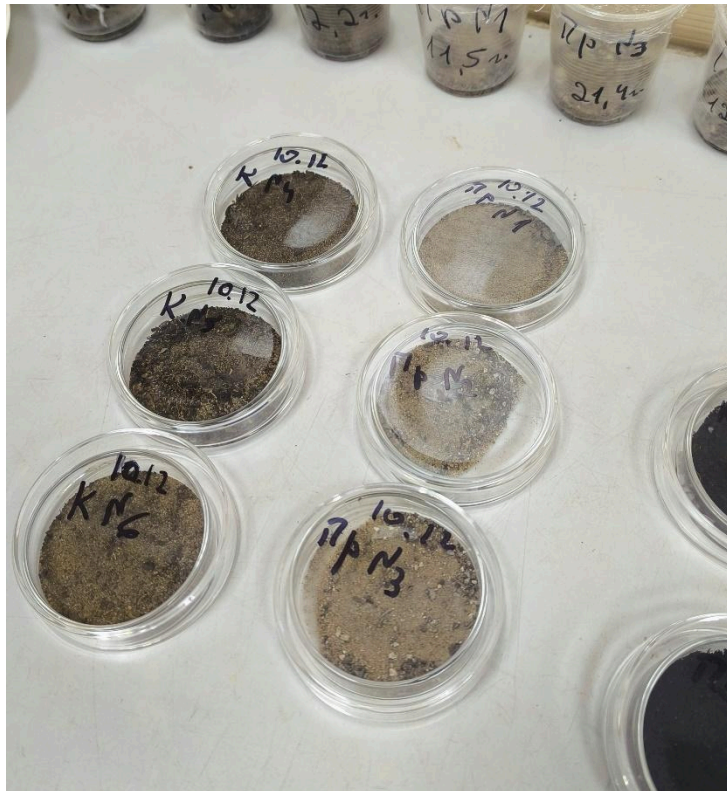
#### 2.1. Матеріал дослідження

Дане дослідження відбувалося шляхом біотестування салату посівного (*Lactuca sativa L.*) в пробах ґрунту з-під воронки, утвореної від вибуху 152-мм артилерійського снаряду. Зразки ґрунту було зібрано на території ботанічного заказника «Серебрянський» в Луганській області доктором біологічних наук, доцентом кафедри екології та зоології Навчально-наукового центру «Інститут біології та медицини» Київського національного університету імені Тараса Шевченка Трохимцем Владленом Миколайовичем. Площа заказника становить 107,1 га. Заказнику характерна флора бореального типу. Є осередком рідкісних видів рослин, що занесені до Червоної книги України [24].

Дослід проводився в лабораторних умовах з дотриманням методичних рекомендацій та стандартів, встановлених методиками Організації економічного співробітництва та розвитку (OECD). Згідно методичних вказівок, що наявні в OECD Guideline for the Testing of Chemicals, Test No.208: Terrestrial Plant Test: Seedling Emergence and Seedling Growth Test тест-об'єктом для експерименту було обрано *L. sativa* [18]. Перед початком експерименту насіння було візуально оглянуто на наявність пошкоджень чи заражень. Насіння не було оброблене фунгіцидами чи іншими засобами. Кількість насіння, посаженого в чашках Петрі, було обрано відповідно до розмірів насіння та ємності для забезпечення адекватних умов росту. Виробника насіння було обране шляхом експериментального опрацювання методики на насінні декількох виробників.

## 2.2. Проведення дослідження

Було підготовлено ємності діаметром 50 мм, в яких було поміщено 10 г ґрунтового субстрату. Насіння *L. sativa* було посаджено в чашках Петрі у кількості 10 штук.



**Рис. 2.2.1.** Фотографія ємностей з досліджуваними тест-об'єктами

Рослинні тест-об'єкти проростали протягом 10 діб в закритих чашках Петрі в лабораторних умовах, при стабільній температурі та відсутності світла. Деякі умови тестування були дотримані згідно вимог Організації економічного співробітництва та розвитку (OECD). Температурний режим середовища протягом усього періоду проростання підтримувався на рівні  $22^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$  [18]. Вологість ґрунтового субстрату, в якому проводилося дослідження, не визначалася, зважаючи на незначну кількість субстрату.

В дослідженні було сформовано експериментальні та контрольні групи ґрунтових проб. Для аналізу токсичного впливу використовувалися три проби

грунту з різних ґрунтових шарів воронки, три проби контрольного ґрунту на відстані 50 м в різних сторонах від воронки. Відстань між пробами ґрунту в воронці становить 30-35 см від центру до країв воронки. Три проби було відібрано на глибинах 30, 60 та 90 см від поверхні. Як негативний та позитивний контролі було використано комерційний субстрат для рослин.

Позитивний контрольна група проводилася за допомогою використання  $K_2Cr_2O_2$  в робочій концентрації 5мг/г (1мг/1л.). Експериментальні групи та негативна контрольна група були политі 4,5 мл проточної води після посадки насіння.

Після закінчення 10-денного періоду проведення експерименту рослинні тест-об'єкти були вилучені з ґрунтового субстрату для подальшого дослідження. Для *L. sativa* визначалися наступні критерії: частка проростання, %, висота рослини, см, довжина корінців, см, загальна біомаса рослини, г. Вибір досліджуваних критеріїв базувався на адаптації до особливостей морфології відповідних видів рослинних об'єктів, а також на особливостях проростання в ґрунті.

В дослідженні використовується поняття фітотоксичності. Фітотоксичність – здатність хімічних речовин завдавати токсичного впливу на рослини. Фітотоксичність може проявлятися в зменшенні частки проростання насіння, зниження біомаси, пригніченні розвитку рослини, уповільненні росту кореневої системи, тощо [22].

Для кількісної оцінки впливу забрудненого ґрунту на рослинні тест-об'єкти було розраховано фітотоксичний ефект (далі – ФЕ) за формулою :

$$FE = (L_0 - L_x) / L_0 * 100\%$$

де  $L_0$  – середня довжина частини рослини, вирощеної в контрольних пробах ґрунту,  $L_x$  – середня довжина частини рослини, вирощеної в експериментальних пробах ґрунту.

Результати визначали за допомогою п'ятибальної шкали фітотоксичності (табл. 2.2.1.)[21].

**Таблиця 2.2.1.**

**Шкала для визначання рівня фітотоксичності**

<b>Фітотоксичний ефект, %</b>	<b>Рівень токсичності</b>
0-20	Відсутній або слабкий рівень
20,1-40	Середній рівень
40,1-60	Вище середнього рівня
60,1-80	Високий рівень
80,1-100	Максимальний рівень

**2.3. Статистичний аналіз**

Статистичний аналіз проводився за допомогою загальноприйнятих методів описової статистики в програмному забезпеченні PAST 4.16, Microsoft Excel 2016 та OriginPro 2025.

Загалом було проведено 45 статистичних тестів, серед яких використовувалися t-критерій Стьюдента, для перевірки відмінностей між середніми значеннями при нормальному розподілі, та тест Манна-Уїтні, як альтернатива для вибірок з ненормальним розподілом. Нормальність розподілу була встановлена за тестом на нормальність Харке-Бера.

Встановлено, що частка відмінностей з високим рівнем статистичної значущості ( $p < 0,05$ ) між контрольними групами та негативним контролем становить 55,5% (5/9 порівнянь), що свідчить про наявність достовірної різниці для більшості досліджених груп (табл. 2.3.1.).

Таблиця 2.3.1.

**Значення рівня статистичної значущості між вибірками контрольних груп та негативного контролю**

Варіант	Висота рослини	Довжина корінця	Біомаса
	Негативний контроль		
Ґрунт з поверхні #1	0,14095	0,96072	4,41E-06
Ґрунт з поверхні #2	0,004775	0,02541	2,66E-05
Ґрунт з поверхні #3	0,17357	0,66323	0,002506

Між експериментальними групами та негативним контролем встановлено значущість 44,4% (4/9) (табл. 2.3.2.).

Таблиця 2.3.2.

**Значення рівня статистичної значущості між вибірками експериментальних груп та негативного контролю**

Варіант	Висота рослини	Довжина корінця	Біомаса
---------	----------------	-----------------	---------

Продовження таблиці 2.3.2.

	Негативний контроль		
Проба 30 см	0,032789	0,058642	0,005561
Проба 60 см	0,045304	0,055975	0,36202
Проба 90 см	0,10713	0,44432	0,036504

Проаналізовано рівень значущості між експериментальними пробами ґрунту та зразками ґрунту з поверхні за основними морфологічними критеріями. Встановлено, що:

За висотою рослини статистично значущі відмінності виявлено у 55,5% випадків (5/9 порівнянь);

За довжиною корінців – 55,5% (5/9);

За біомасою рослин – встановлено 88,8% (8/9) (табл. 2.3.3.).

Таким чином, загальна частка відмінностей з високою статистичною значущістю становить 60% (27/45 порівнянь).

Таблиця 2.3.3.

**Значення рівня статистичної значущості між вибірками  
контрольних та експериментальних груп**

Варіант		Проба 30 см	Проба 60 см	Проба 90см
Висота рослини	Ґрунт з поверхні #1	0,267	0,00805	0,02208

## Продовження таблиці 2.3.3.

	Ґрунт з поверхні #2	0,3395	1,67E-06	0,0015
	Ґрунт з поверхні #3	0,0059	0,25468	0,98731
Довжина корінця	Ґрунт з поверхні #1	0,0382	0,00581	0,39841
	Ґрунт з поверхні #2	0,7798	0,00102	0,00473
	Ґрунт з поверхні #3	0,0324	0,17355	0,8294
Біомаса	Ґрунт з поверхні #1	0,0009	6,22E-05	0,01032
	Ґрунт з поверхні #2	0,0153	0,00039	0,00255
	Ґрунт з поверхні #3	0,2352	0,00811	0,0031

#### 2.4. Оцінка генотоксичності на основі мікроядерного тесту

З метою виявлення потенційного генотоксичного впливу забруднених ґрунтових зразків на клітинному рівні було заплановано, і частково реалізовано мікроядерний тест та оцінка генотоксичності. Генотоксичний вплив, що фіксується мікроядерним тестом проявляється у вигляді аберацій – часткової втрати хромосоми, анеугенезу – втрати повноцінної хромосоми, появою мікроядер. Мікроядра утворюються як наслідок розриву ДНК та веретена поділу або гістонових білків. Мікроядерний тест є важливим, оскільки наявність власне мікроядер є ознакою наявності токсичного ефекту.

Клітини, у яких наявні мікроядра, можуть припинити розвиток, продовжити ділитися, апоптувати.

Тест на генотоксичність передбачав дослідження наявності в клітинах зони росту корінців *L. sativa* хромосомних аберацій, мікроядер та представленості різних стадій поділу ядра. Даний тест виконується низкою етапів: фіксація корінців, мацерація, фарбування, виготовлення давлених препаратів та мікроскопічний аналіз.

На етапі фіксації було відділено зразки апікальної меристеми корінців та поміщено у фіксуєчий розчин Кларка (оцтовий алкоголь) на 2 доби. Мета фіксації полягає у стабілізації клітинних структур.

Після фіксації зразки апікальної меристеми були поміщені на годинникове скло з кислотою. Етап мацерації передбачає розчинення міжклітинною речовини з використанням кислот. Було проведено декілька варіацій мацерації: 9% оцтова кислота – 5 хв, 5 М HCl – 5, 10, 15, 20 хв, 10 М HCl – 5, 10, 15, 20 хв. Метою етапу було досягнення максимальної деструкції міжклітинною рідини для подальшого отримання моношару клітин.

Після мацерації корінці були забарвлені в ацетоорсеїні з експозицією 5, 10 та 15 хв, що повинно було забезпечити доступність візуалізації хромосомного матеріалу в клітинах. Забарвлені корінці були промиті в дистильованій воді.

Забарвленні зразки були переміщені на предметне скельце у краплину дистильованої води, накриті покривним скельцем і притиснуті колоподібними рухами металевим предметом.

Згідно методики, передбачалося, що з кожного зразка апікальної меристеми корінця повинно було бути проаналізовано, при збільшенні в 1000 разів під світловим мікроскопом, 1000 клітин на наявність мітозних стадій, а також клітин з хромосомними абераціями, зокрема з мікроядрами. Подальший аналіз передбачав розрахунок мітотичного індексу.

Опрацювання даної методики з *Lactuca sativa L.* та *Alium cepa L.* в різних експозиціях кожного перерахованого етапу не забезпечив задовільного

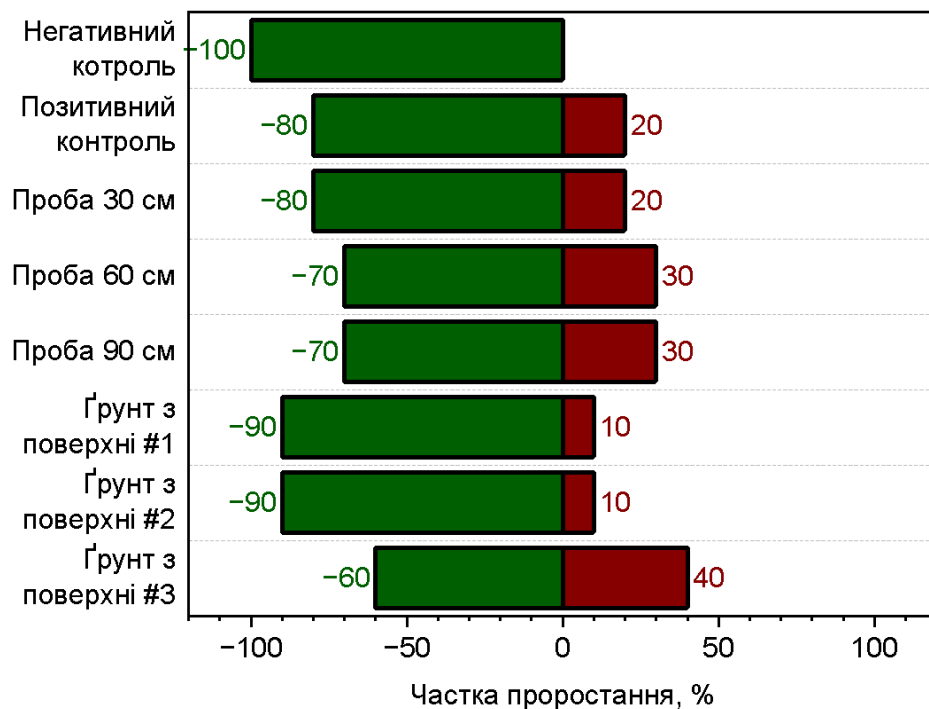
результату: у жодному з приготованих препаратів не вдалося досягти необхідного моношару клітин, що унеможливило їхній цитологічний аналіз. З огляду на відсутність придатних для аналізу препаратів було прийнято рішення відмовитися від подальшого проведення генотоксичного тесту в межах даного дослідження.

## РОЗДІЛ 3

### Результати досліджень та їх обговорення

#### 3.1. Якісні ознаки негативного впливу

В результаті дослідження було протестовано в загальній кількості 64 представники *L. sativa*, що становить 80% від усіх посаджених насінин. Це дозволяє вважати вибірку репрезентативною для виявлення потенційного токсичного впливу досліджуваних ґрунтів. Показники проростання насіння було зафіксовано для кожної групи в дослідженні. Частку проростання *L. sativa* в досліджуваних групах зображено на рис. 2.3.3. Встановлено проростання салату посівного в експериментальних зразках ґрунту в межах нормативних показників – не менше 70%. Винятком стала проба ґрунту з поверхні #3, де показник проростання виявився найнижчим, і становить 60%.



**Рис. 2.3.3.** Частка проростання салату посівного (*Lactuca sativa L.*) в досліджуваних групах

В ході біотестування рослинного тест-об'єкту в експериментальних ґрунтових пробах було виявлено низку морфологічних дефектів, що свідчать про потенційну фітотоксичність досліджуваних ґрунтових зразків. В рослин, вирощених в пробі ґрунту з глибини 30 см спостерігалася в'ялість, і ламкість стебел та кореневої системи. Важливим дефектом також є забарвлення стебел паростків, яке відрізнялося від характерного білого кольору. Аналогічні морфологічні дефекти було встановлено в контрольному зразку з поверхні ґрунту #3. Також дефекти були присутні в позитивній контрольній групі, що підтверджує ефективність  $K_2Cr_2O_7$  в якості стандартизованого токсиканта для використання у біотестуванні: фітотоксичний вплив у цьому випадку був очікуваним.

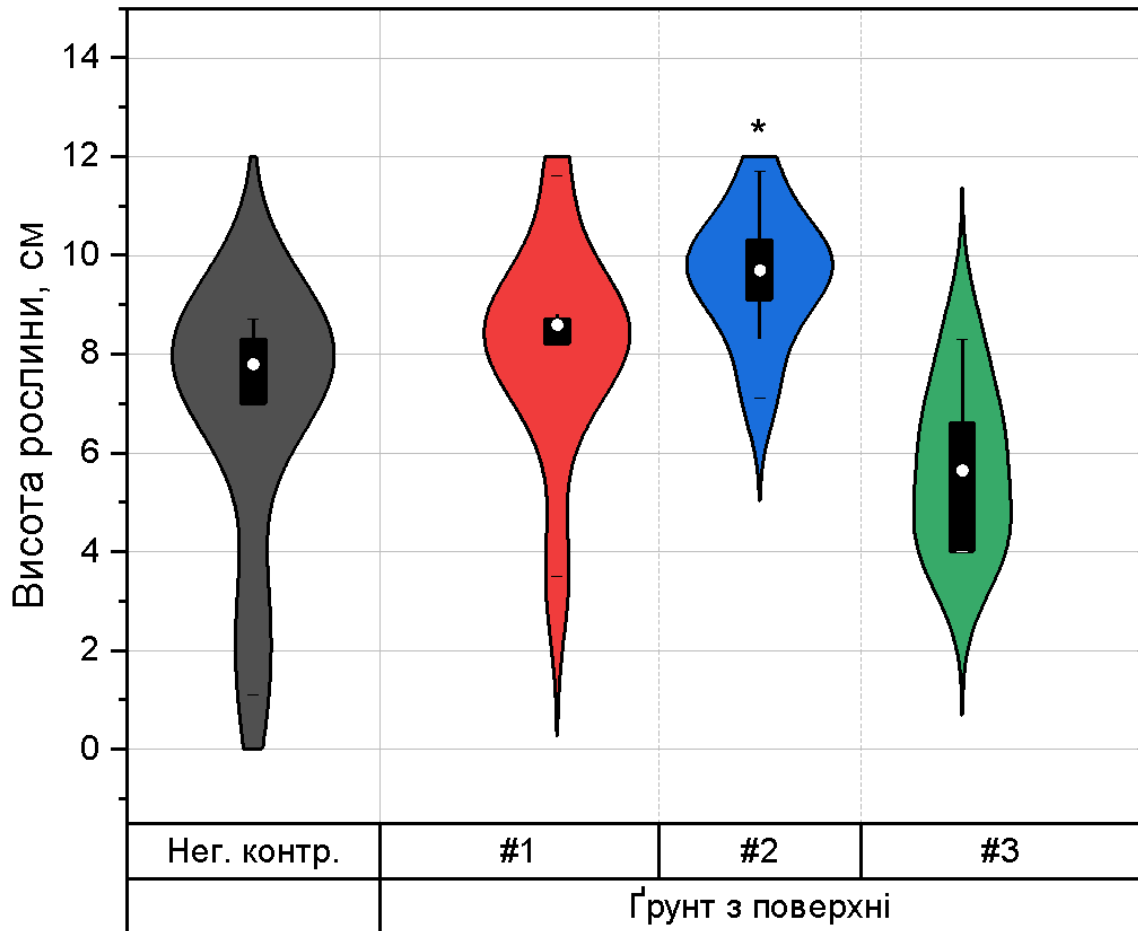


**Рис. 3.1.1.** Фотографія з зображенням дефектів експериментальних особин салату посівного (*Lactuca sativa L.*)

### 3.2. Результати та їх обговорення

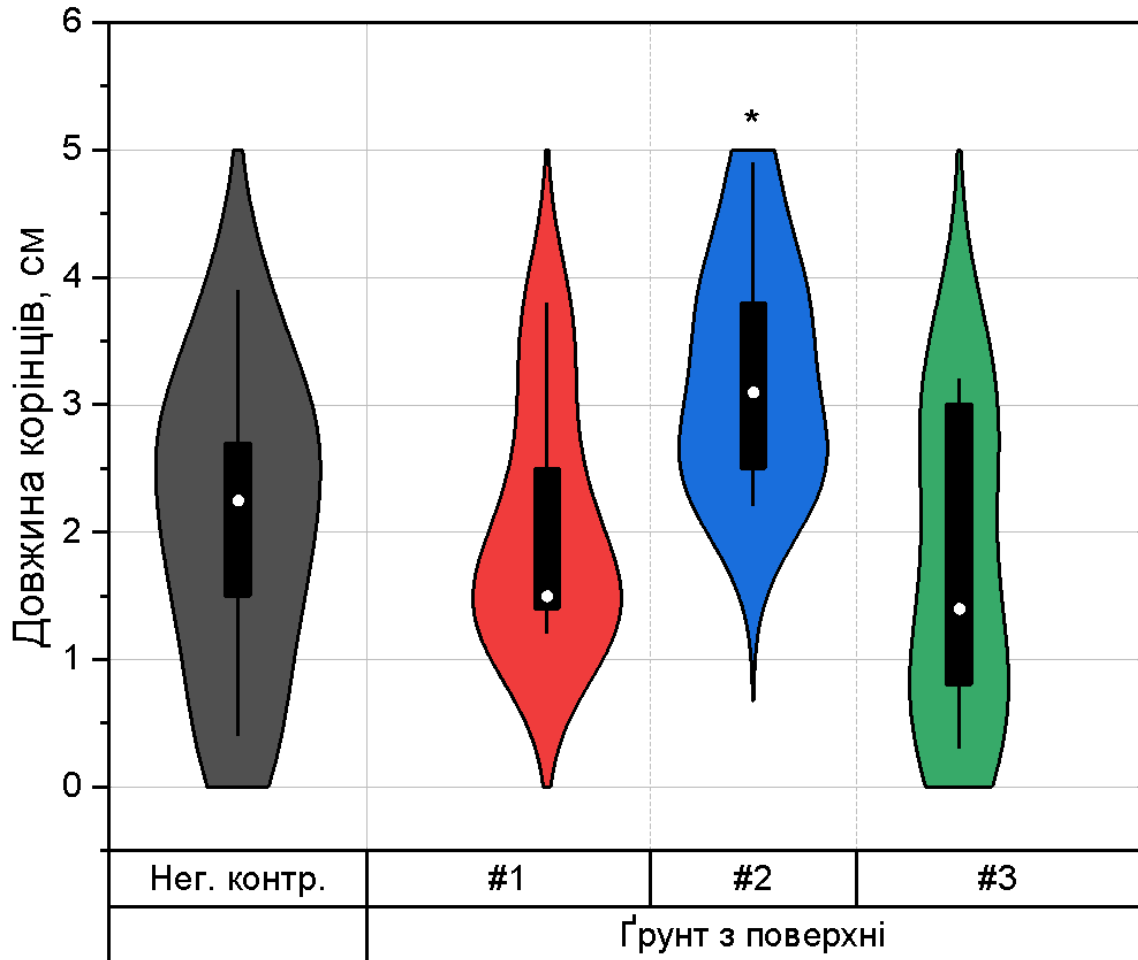
Безпосередні результати вимірювань наведено в додатках (додаток А). На рис. 3.2.1.-3.2.6. порівнюються показники різних груп дослідження за розмірними та ваговими критеріями органів рослин.

На рис. 3.2.1. наведено результати розподілу значень висоти серед контрольних груп *L. sativa*. Встановлено, що найбільші значення має група з поверхні #2. Різниця між медіанами проб з поверхні #1 та #2 становить 0,9 см (12,7%), а між #2 та #3 – 4,05 см (58,2%). Різниця медіан зразків ґрунту з поверхні #1, #2, #3 з негативною контрольною групою становить 0,8, 1,9 та 2,15 см (10,2%, 24,3% та 27,5%) відповідно. Найбільша дисперсія спостерігається в розподілі даних негативною контрольною групою. Найменше розсіювання даних – зразок з поверхні #2. Групи негативного контролю та зразку з поверхні #1 мають сильний перекид симетрії, в свою чергу, решта груп мають симетрію, близьку до нормальної. Викиди наявні в групах негативного контролю та в зразку з поверхні #1.



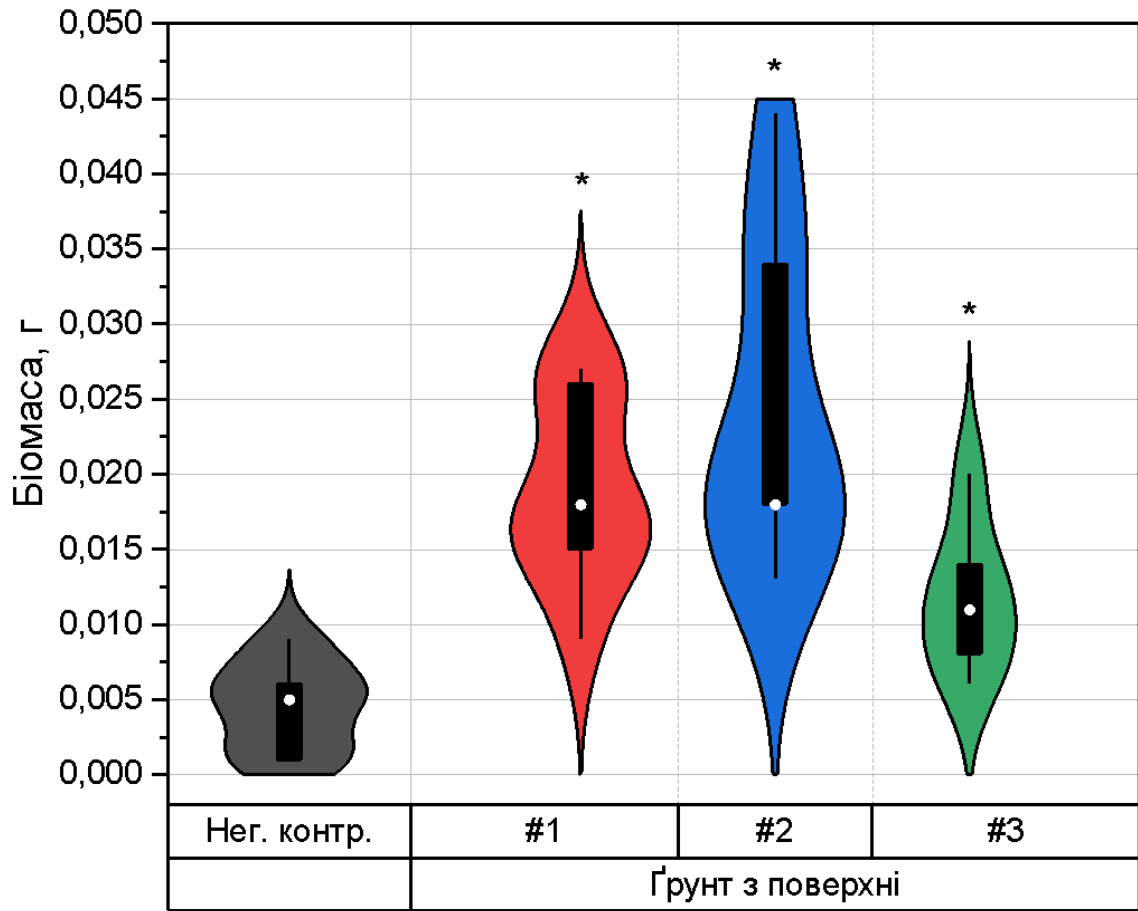
**Рис. 3.2.1.** Розподіл значень висоти салату посівного (*Lactuca sativa* L.) між контрольними групами

На рис. 3.2.2. наведено результати розподілу значень довжини корінців серед контрольних груп *L. sativa*. Встановлено, що найбільше значення має медіана зразку з поверхні #2. Медіана даної проби є більшою за негативний контроль та проби з поверхні #1 та #3 на 0,85, 1,6 та 1,7 см (37,7%, 40,5% та 7,1%) відповідно. Медіани груп #1 та #3 менші від негативного контролю на 0,75 та 0,85 см (33,3% та 37,7%) відповідно. Найбільшою дисперсією є в негативному контролі, найменшою в групі #1. Нормальна симетрія притаманна зразку #2, решті груп властива сильна асиметрія розподілу значень. Викиди відсутні.



**Рис. 3.2.2.** Розподіл значень довжини корінців салату посівного (*Lactuca sativa L.*) між контрольними групами

На рис. 3.2.3. наведено результати розподілу значень біомаси серед контрольних груп *L. sativa*. Встановлено, що найбільші значення медіан мають зразки з поверхні #1 та #2, які становлять 0,018 та 0,018 г. Медіани зразків ґрунту з поверхонь #1, #2 та #3 є більшими за негативний контроль на 0,013, 0,013 та 0,006 г (260%, 260% та 120%) відповідно. Найбільшою є дисперсія в зразку #2, в свою чергу, дисперсія негативного контролю – найменшою. Симетрія, наближена до нормальної, притаманна зразку #3. Зразок #1 та негативний контроль мають незначну асиметрію даних, а зразок #2 має екстремальну асиметрію розподілу значень. Викиди відсутні.



**Рис. 3.2.3.** Розподіл значень біомаси салату посівного (*Lactuca sativa L.*) між контрольними групами

Узагальнюючи наведені дані, можна дійти до висновку, що існують суттєві відмінності між контрольними групами та пробами ґрунту з поверхні. Ґрунт з зразку #2 має найбільші значення серед усіх розподілів. В розподілі біомаси ґрунтовий субстрат негативного контролю проявляє найслабші якості, поступаючись зразку #3, який має найнижчі показники в решті розподілів.

Такі відмінності можна пояснити різницею в природних властивостях ґрунтових горизонтів досліджуваних зразків.

На рис. 3.2.4. наведено розподіл значень висоти рослини серед усіх експериментальних та контрольних зразків *L. sativa*. На цьому рисунку можна побачити, що зразок ґрунту, відібраний з глибини 30 см має значення висоти рослини подібні до зразків поверхневого шару ґрунту та до негативного контролю. Цей зразок також проявляє слабкі ознаки фітотоксичного ефекту в порівнянні з рештою зразків. Проба з глибини 60 см справила найбільший негативний вплив на салат, висота рослин у досліді на 29,4% менша за контроль. Дані відмінності є статистично значущими. Висота рослин з проби ґрунту з глибини 90 см менша за контроль на 16,2%, і дані відмінності не становлять статистичну значущість. Рівень фітотоксичного ефекту за висотою рослин оцінюємо як середній, середній, та слабкий з глибин 30, 60 та 90 см відповідно.

#### **Порівняння експериментальних груп з негативним контролем.**

Порівнюючи з негативним контролем, значення медіан зразків проби 60 см та проби 90 см менше на 3,2 та 2,1 см (41% та 26,9%) відповідно. Дисперсія експериментальної проби 30 см є близькою до дисперсії негативного контролю, в свою чергу розкид даних проби 60 см значно менший від негативного контролю, а дисперсія проби 90 см близька до негативного контролю. Розподіл значень негативного контролю, проби 30 та 90 см хилиться до асиметрії, в свою чергу, симетрія проби 60 см близька до нормальної. Викиди наявні лише в негативному контролі.

#### **Порівняння експериментальних груп з поверхневими контрольними групами.**

Встановлено, що серед експериментальних груп, згідно з графіком, найбільшою є медіана проби 30 см, яка становить 9,45 см, і є більшою за проби 60 та 90 см на 4,86 та 3,75 см (48,6% та 60,4%) відповідно. Значення медіан проб 60 та 90 см суттєво відрізняються від зразків ґрунту з поверхні

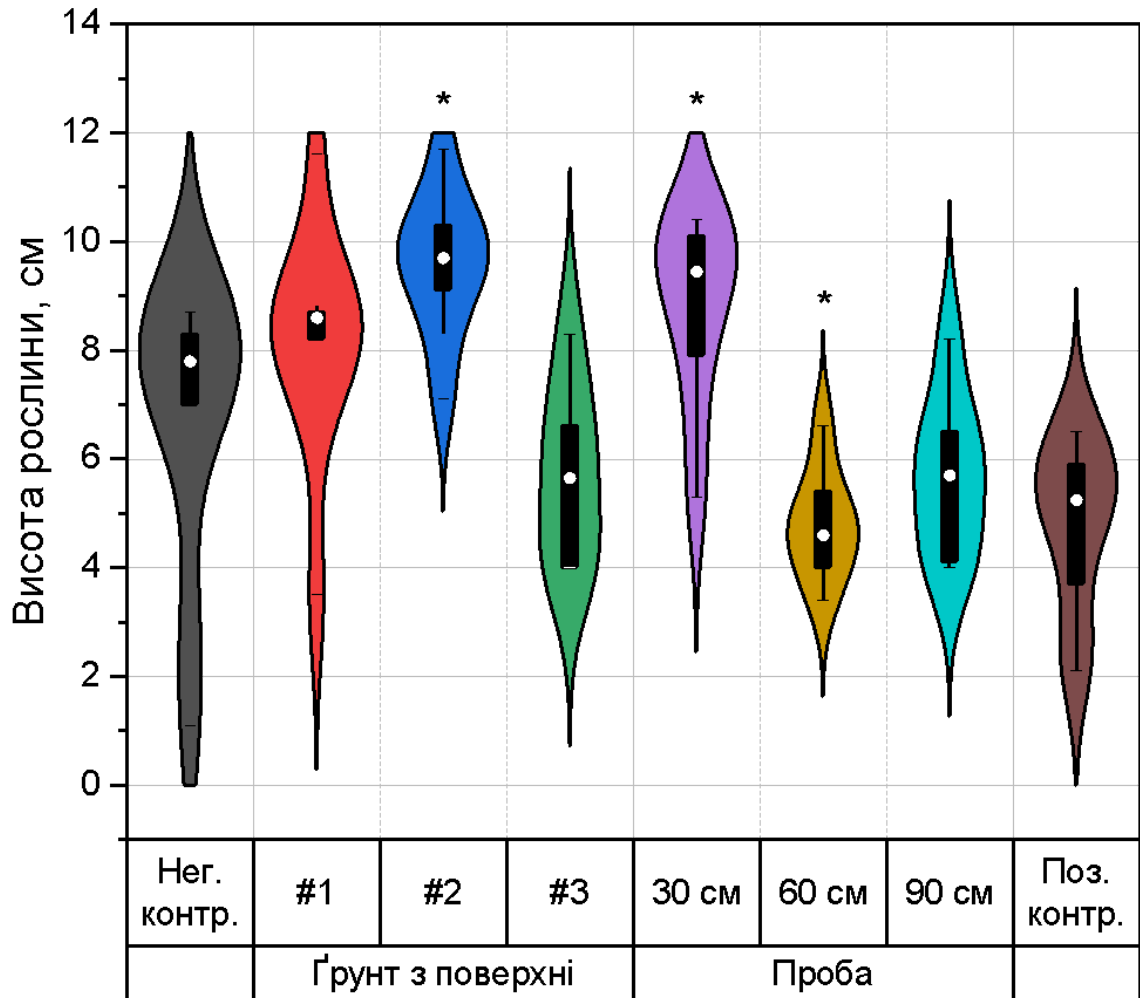
#1 та #2 – менші на 4 та 5,1 см (46,6% та 51,5%), і 2,9 та 4 см (33,8% та 41,3%) відповідно.

Дисперсії проб 60 та 90 см є близькими до дисперсії зразків з поверхні #2 та #3. Дисперсія зразку #1 є незначною. Розподілу значень зразку #1 властива сильна асиметрія, в свою чергу, решта груп мають симетрію близьку до нормальної. Викиди присутні лише в зразку з поверхні #1.

### **Порівняння експериментальних груп з позитивним контролем.**

Медіана проби 60 см є меншою від позитивного контролю на 0,65 см (12,3%), і також меншу дисперсію. Медіана проби 90 см близька до позитивного контролю – більша всього на 0,45 см (8,5%). Проба 30 см значно більша від позитивного контролю на 4,2 см (80%).

Загалом, проба 60 см демонструє найменші значення, медіану та розкид даних, що може вказувати на стабільність цих даних, проте слабкі властивості даного експериментального ґрунту, порівняно як з негативним контролем, так і експериментальними контрольними групами, для показника висоти рослини.



**Рис. 3.2.4.** Розподіл значень висоти салату посівного (*Lactuca sativa L.*) між усіма досліджуваними групами

На рис. 3.2.5. наведено розподіл значень довжини корінців серед експериментальних та контрольних зразків *L. sativa*. Окрім висоти рослини, проба ґрунту з глибини 60 см проявляє негативний вплив на салат й за довжиною корінців, значення чого в даній пробі на 62,5% менше за негативний контроль. Проба з глибини 90 см також негативно впливає на показники росту салату, проте проявляє менше пригнічення тест-об'єкту, ніж викликане пробою з глибини 60 см: довжина корінців на 20,7% менше за

контроль. Рівень фітотоксичного ефекту за даним параметром – високий та середній для зразків з глибин 60 та 90 см відповідно.

Отримані результати можна пояснити або найбільш негативним впливом від вибуху снаряду саме на шари ґрунту глибиною 60 та 90 см, або відмінностями в морфологічних та фізико-хімічних властивостях ґрунтових горизонтів, які впливають на розвиток рослин.

#### **Порівняння експериментальних груп з негативним контролем.**

Найбільшою є медіана проби 30 см, яка більша за негативний контроль на 1,05 см (46,6%). Медіани решти експериментальних груп менші за негативний контроль на 1,65 та 0,55 см (73,3% та 24,4%) відповідно.

Дисперсія проби 30 см близька до негативного контролю, проби 60 см значно менша від негативного контролю, проби 90 см незначно менша. Асиметрія проявляється в пробі 60 см, решта груп мають симетрію близьку до нормальної. Викиди наявні лише в пробі 60 см.

#### **Порівняння експериментальних груп з контрольними групами.**

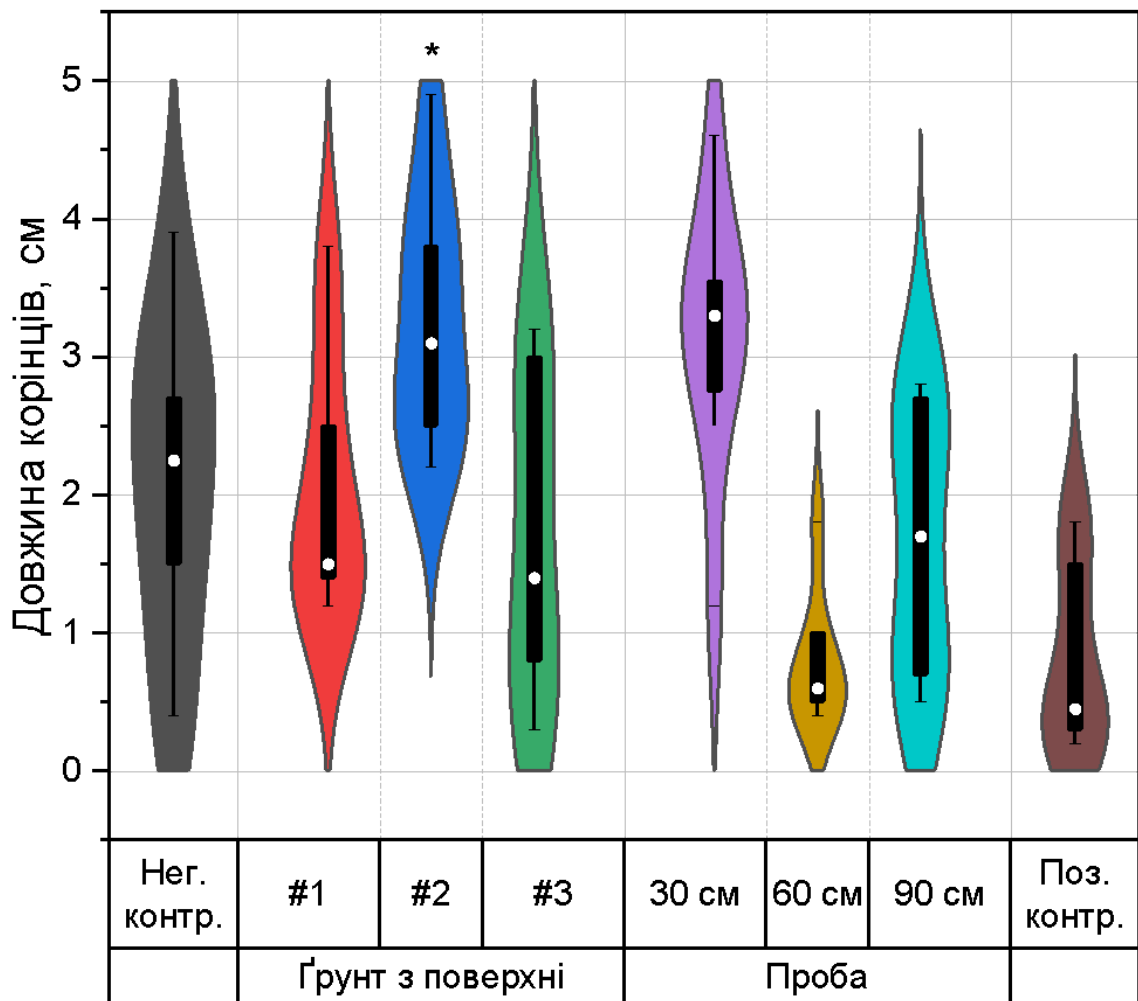
Медіана проби 30 см більша за контрольні зразки з поверхні на 1,8, 0,2 та 1,9 см (54,6%, 6,1% та 57,8%) відповідно. Проба 60 см має значення менші за усі контрольні групи, медіана менша на 0,9, 2,5 та 0,8 см (60%, 80,7% та 57,2%) відповідно. Медіана проби 90 см більша за медіани зразків з поверхні #1 та #3 на 0,2 та 0,3 см (11,8% та 11,7%) відповідно, а також менша від зразка #2 на 1,4 см (45,2%).

Дисперсії експериментальної проби 30 та 60 см значно менші за контрольні групи, за виключенням проби 90 см, яка має дисперсію більшу за зразки #1 та #2, проте незначно меншу за #3. Викиди серед контрольних груп відсутні.

#### **Порівняння експериментальних груп з позитивним контролем.**

Медіани усіх експериментальних груп більші за медіану позитивного контролю на 2,85, 0,15 та 1,25 см (633%, 33,3% та 277,7%) відповідно. Дисперсія позитивної групи значно менша за дисперсію проби 30 та 90 см, проте більша за пробу 60 см. В позитивній контрольній групі прослідковується значна асиметрія розподілу значень, що є спільним з пробою 60 см. Викиди відсутні.

Загалом, експериментальна група проби 60 см, як і в попередньому аналізі, має найменші значення, дисперсію, а також асиметрію, що суттєво відрізняє її від решти груп, та вказує на несприятливі властивості ґрунту для проростання корінців.



**Рис. 3.2.5.** Розподіл значень довжини корінців салату посівного (*Lactuca sativa* L.) між усіма досліджуваними групами

На рис. 3.2.6. наведено розподіл значень біомаси серед експериментальних та контрольних зразків *L. sativa*. В результаті вимірювання біомаси виявилось, що біомаса салату, вирощеного на комерційному субстраті, тобто в позитивному та негативному контролях, набагато нижча ніж біомаса салату, вирощеного в зразках тестованого ґрунту. Тому ми вважаємо більш коректним проводити порівняння проб ґрунту із воронки з пробами поверхневого ґрунту, відібраного в тій ж місцевості.

За результатами такого порівняння виявлено високий рівень фітотоксичного ефекту у зразках з воронки порівняно з поверхневим ґрунтом. Найбільші відмінності мають зразки з усіх трьох глибин, порівняно з зразком #2. Значення фітотоксичного ефекту складають 63, 77,1 та 65% відповідно. Встановлено, що проба ґрунту з глибини 60 см проявляє найбільший рівень фітотоксичності за параметром біомаси. Дані статистичні відмінності є статистично значущими, і їх можна пояснити різницею в ґрунтових горизонтах, з яких було взято проби.

**Порівняння експериментальних груп з негативним контролем.**

Медіани експериментальних проб 30 та 90 см є подібними, і мають різницю лише в 0,0005 г (5,3%), а також більші за негативний контроль на 0,0045 та 0,004 г (90% та 80%) відповідно. Медіана проби 60 см значно менша від решти груп на 0,0045 та 0,004 г (47,4% та 54,5%) відповідно, проте однакова з медіаною негативного контролю.

Найменшу дисперсію проба 60 см, найбільшу – проба 90 см. Дисперсія проби 30 см подібна на негативний контроль. Симетрія проби 30 та 90 см близька до нормальної, негативний контроль має незначну асиметрію, а проба 60 см має абсолютну асиметрію, оскільки медіана збігається з першим та нульовим квантилями значень. Викиди відсутні.

### **Порівняння експериментальних груп з контрольними групами.**

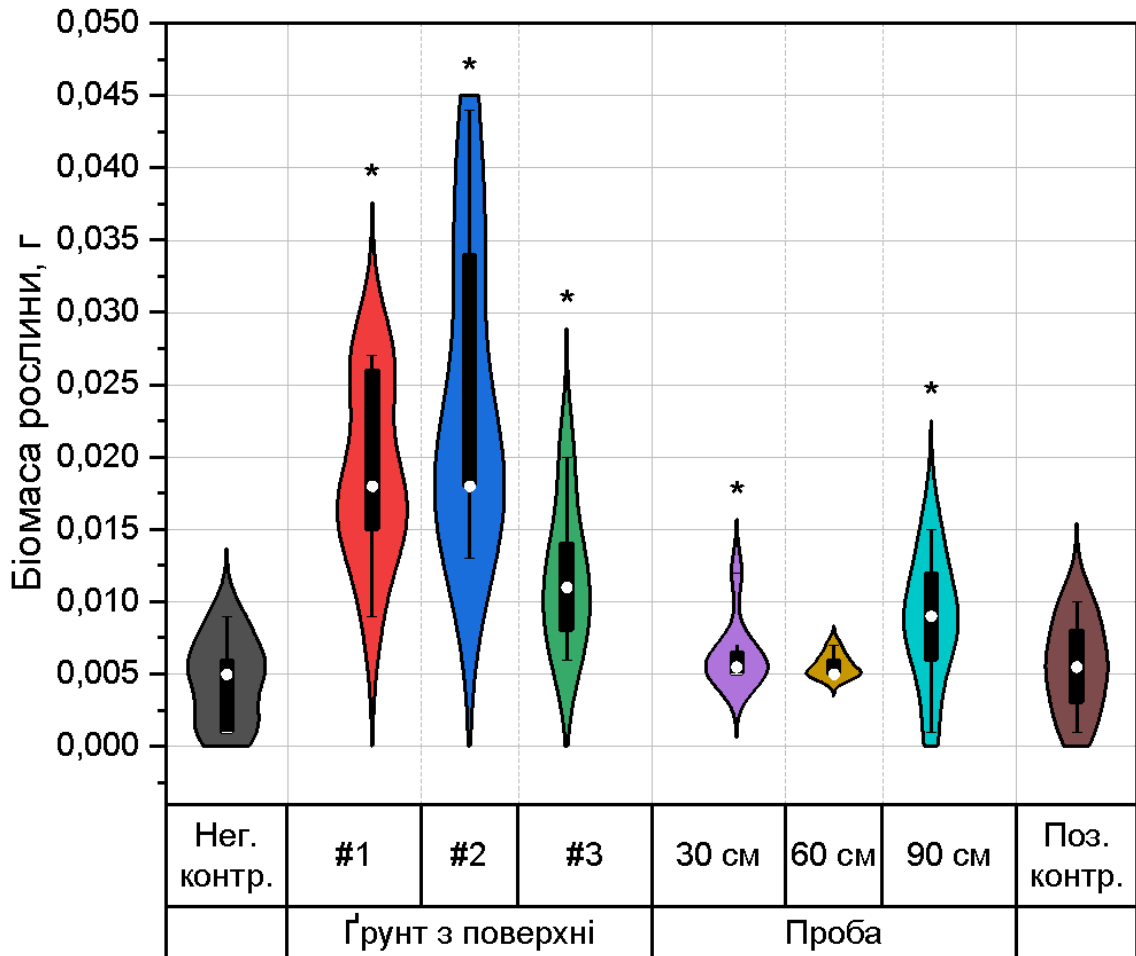
Медіани усіх експериментальних проб є меншими за медіани зразків ґрунту з поверхні. Проба 30 см менша на 0,0085, 0,0085 та 0,0015 г (47,2%, 47,2% та 13,7%) відповідно. Проба 60 см менша на 0,0013, 0,0013 та 0,006 г (72,3%, 72,3% та 54,6%) відповідно. Проба 90 см менша на 0,009, 0,009 та 0,002 г (50%, 50% та 18,2%) відповідно.

Дисперсії усіх проб значно менші за контрольні зразки, за винятком проби 90 см, дисперсія якої є близькою до дисперсії зразка #3. Для даного зразка властива симетрія, близька до нормальної, в свою чергу зразок з поверхні #1 та #2 мають сильну асиметрію. Викиди серед експериментальних контрольних груп відсутні.

### **Порівняння експериментальних груп з позитивним контролем.**

Медіани експериментальних проб 30 та 90 см більші за позитивний контроль на 0,004 та 0,0035 г (72,7% та 63,6%) відповідно. Медіана проби 60 см менша на 0,0005 г (9,1%). Дисперсія в позитивному контролі більша за проби 30 та 60 см, проте незначно менша за пробу 90 см. Симетрія розподілу значень позитивного контролю близька до нормального, що є спільним для експериментальних проб 30 та 90 см, і, в свою чергу, відрізняється від проби 60 см. Викиди в позитивному контролі відсутні.

Загалом, значення біомаси в даному розподілі є кращими за негативний контроль, проте значно поступаються значенням експериментальних контрольних груп. Серед експериментальних зразків проба 60 см має найменші значення та дисперсію, і абсолютну асиметрію. Таким чином можна припустити, що властивості даного ґрунту є несприятливими для біомаси рослин, особливо на глибині проби 60 см.



**Рис. 3.2.6.** Розподіл значень біомаси салату посівного (*Lactuca sativa L.*) між усіма досліджуваними групами

Оцінка рівнів фітотоксичного ефекту експериментальних зразків ґрунту на *L. sativa* представлена в таблиці 3.2.7. Розрахункові значення фітотоксичного ефекту представлено в додатках (додаток Б).

**Таблиця 3.2.7.**

**Фітотоксичний ефект експериментальних проб ґрунту**

Варіант		Проба 30 см	Проба 60 см	Проба 90 см
ФЕ за схожістю	Негативний контроль	Відсутній або слабкий рівень	Відсутній або слабкий рівень	Відсутній або слабкий рівень
	Контрольна група #1	Відсутній або слабкий рівень	Середній рівень	Середній рівень
	Контрольна група #2	Відсутній або слабкий рівень	Середній рівень	Середній рівень
	Контрольна група #3	Середній рівень	Відсутній або слабкий рівень	Відсутній або слабкий рівень
ФЕ за довжиною корінців	Негативний контроль	Вище середнього рівня	Високий рівень	Середній рівень
	Контрольна група #1	Вище середнього рівня	Високий рівень	Відсутній або слабкий рівень
	Контрольна група #2	Відсутній або слабкий рівень	Високий рівень	Вище середнього рівня
	Контрольна група #3	Максимальний рівень	Вище середнього рівня	Відсутній або слабкий рівень
ФЕ за висотою рослин	Негативний контроль	Середній рівень	Середній рівень	Відсутній або слабкий рівень
	Контрольна група #1	Відсутній або слабкий рівень	Вище середнього рівня	Середній рівень

Продовження таблиці 3.2.7.

	Контрольна група #2	Відсутній або слабкий рівень	Вище середнього рівня	Вище середнього рівня
	Контрольна група #3	Вище середнього рівня	Відсутній або слабкий рівень	Відсутній або слабкий рівень
ФЕ за біомасою рослини	Негативний контроль	Максимальний рівень	Середній рівень	Максимальний рівень
	Контрольна група #1	Вище середнього рівня	Високий рівень	Вище середнього рівня
	Контрольна група #2	Високий рівень	Високий рівень	Високий рівень
	Контрольна група #3	Середній рівень	Вище середнього рівня	Середній рівень

## ВИСНОВКИ

1. Ґрунт, забруднений внаслідок влучання артилерійського снаряду, призводить до незначного зниження проростання насінин, та невеликої кількості морфологічних дефектів. Оцінка фітотоксичного ефекту для проби з глибини 30 см – 11%, для 60 см – 22%, для 90 см – 22%.
2. Найбільший негативний вплив на висоту салату посівного (*Lactuca sativa L.*) спричиняють зразки ґрунту з воронки з глибини 60 та 90 см. Привертає увагу, що вплив зразка з глибини 60 см більший, ніж негативний вплив зразка з 90 см. Оцінка фітотоксичного ефекту для 30 см – 0,4%, 60 см – 45,5%, 90 см – 35,2%.
3. Найбільший негативний вплив на довжину корінців салату посівного (*Lactuca sativa L.*) спричиняють зразки ґрунту з воронки з глибини 60 та 90 см. Вплив зразка з глибини 60 см більший, ніж негативний вплив зразка з 90 см. Оцінка фітотоксичного ефекту для 30 см – 24%, 60 см – 68,8%, 90 см – 34,2%.
4. Найбільший негативний вплив на біомасу салату посівного (*Lactuca sativa L.*) спричиняють зразки ґрунту з воронки з глибини 60 та 90 см. Вплив зразка з глибини 60 см більший, ніж негативний вплив зразка з 90 см. Оцінка фітотоксичного ефекту для 30 – 57,6%, 60 – 73,8%, 90 – 59,6%.
5. Отримані результати можна пояснити або найбільш негативним впливом від вибуху снаряду саме на шари ґрунту глибиною 60 та 90 см, або відмінностями в морфологічних та фізико-хімічних властивостях ґрунтових горизонтів, які впливають на розвиток рослин. Отримані результати вказують на необхідність подальших досліджень ґрунтів, що зазнали впливу воєнних дій.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Decaëns, T., Jimenez, J., Gioia, C., Measey, G. and Lavelle, P. (2006). The values of soil animals for conservation biology. *European Journal of Soil Biology*, 42, pp. 23–38.
2. Van Gestel, C. (2012). Soil ecotoxicology: state of the art and future directions. *ZooKeys*, 176, pp. 275–296.
3. Чвалюк, Г., Грубінко, В., Гуменюк, Г., Мацюк, О. (2022). Як війна знищує екологію України. *Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка*, 4, сс. 1-16.
4. *Interfax-Україна: Лінія активних бойових дій становить понад 970 км - Генштаб ЗСУ.* [online] Available at: <https://interfax.com.ua/news/general/1000800.html> [Accessed 06 Nov. 2024].
5. Дерев'яненко, С., Мустафаєва, С. (2022). Екоцид: склад та перспективи його включення до юрисдикції міжнародного кримінального суду у зв'язку із повномасштабним військовим вторгненням Російської Федерації на територію України. *Трибуна молодого науковця*, 36, сс. 46-51.
6. *Державна екологічна інспекція України: Актуальна інформація про завдані збитки довкіллю внаслідок збройної агресії рф* [online] Available at: <https://www.dei.gov.ua/post/aktualna-informatsiya-pro-zavdani-zbitki-dovkilliyu-v-naslidok-zbrojnoi-agres...> [Accessed 06 Nov. 2024].
7. Журнал про екологічні наслідки війни. Ukraine War Environmental Consequences Work Group. Випуск 10. Українською. *UWEC*. (2022). 2, с. 4.
8. Pokhyl, O., Masiuk, O. (2023). Combat actions impact on the ecosystems of Ukraine, ed. *Ecology is priority*. Kharkiv, Ukraine.
9. Ачасов, А., Селіверстов, О., Ачасова, А. (2022). Екологічні наслідки бойових дій: ґрунтовий аспект. В: *Сучасний стан ґрунтового покриву України в умовах збройної агресії російської федерації*. Харків, Україна, 20 жовтня, 2022, сс. 12-14.

10. Evans, R., Seddon, B. (2022). Explosive Ordnance Guide for Ukraine - Second Edition. *GICHD*, [online]. Available at <https://www.gichd.org/publications-resources/publications/explosive-ordnance-guide-for-ukraine-second-edition/> [Accessed 11 Jun. 2025].
11. Альбом основних ВВ, взривачей, мин, боеприпасов, выстрелов ПТРК и ПЗРК. Книга ворога, ворожою мовою. (2023) Київ: “СВАРОГ”.
12. Дерев’янчук, А. (2011). Основи будови артилерійських гармат та боеприпасів. Підручник. *Сумський державний університет*, с. 232.
13. Campbell, J. (1985). *Naval Weapons of World War Two*. Annapolis, Maryland: Naval Institute Press.
14. Davis, L. (1943). *The Chemistry of Powder & Explosives*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
15. Mossri, L., Rodrigues, R., Nichele, J., Borges, I. (2023). Nitrocellulose-based propellants: elucidation of the mechanisms of the diphenylamine stabilizer employing density functional theory. *Journal of Energetic Materials*, pp. 1-19.
16. Mendonça-Filho, L., Rodrigues, R., Rosato, R., Galante, E., Nichele, J. (2019). Combined evaluation of nitrocellulose-based propellants: toxicity, performance, and erosivity. *Journal of Energetic Materials*, 37(3), pp. 293-308.
17. *NavWeaps: United States of America 16”/50 (40.60 cm) Mark 7*. [online] Available at: [http://www.navweaps.com/Weapons/WNUS\\_16-50\\_mk7.php](http://www.navweaps.com/Weapons/WNUS_16-50_mk7.php) [Accessed 06 Nov. 2024].
18. OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 2: Effects on Biotic Systems (2006). *Test No. 208: Terrestrial Plant Test: Seedling Emergence and Seedling Growth Test*. [online] Available at: [https://read.oecd-ilibrary.org/environment/test-no-208-terrestrial-plant-test-seedling-emergence-and-seedling-growth-test\\_9789264070066-en#page1](https://read.oecd-ilibrary.org/environment/test-no-208-terrestrial-plant-test-seedling-emergence-and-seedling-growth-test_9789264070066-en#page1) [Accessed 21 Dec. 2024].
19. Hradovych, N., Malynovska, O., Paraniak, R. (2024). The impact of the military actions on the soil ecosystem of Mykolaiv region. *Scientific Messenger of*

*Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Agricultural sciences*, pp. 150-156.

20. Price, C., Brannon, J., Hayes, C. (1997). Effect of Redox Potential and pH on TNT Transformation in Soil-Water Slurries. *Journal of Environmental Engineering*, 123(10), p.1.
21. ЕПЛ: Біотестування токсичності ґрунтів НПП «Кам'янська Січ» з використанням рослинних тест-систем [online] Available at: <https://epl.org.ua/announces/biotestuvannya-toksychnosti-gruntiv-npp-kam-yanska-sich-z-vykorystannyam-roslynnyh-test-system/> [Accessed 04 Jan. 2025].
22. Сподин, С., Тимофеев, М., Корбут, М. (2021). Фітотоксичність та хімічне забруднення ґрунтів. В: *Сучасні проблеми екології*. Житомир, Україна, 15 квітня, 2021, с. 107.
23. Мойш, Н. (2011). *Ґрунтознавство: курс лекцій*. Ужгород: “Гражда”.
24. Арапов, О., Сова, Т., Ференц, В., Іванченко, О. (2008). *Природно-заповідний фонд Луганської області. Довідник*. Луганськ: ВАТ «ЛОД».
25. *Геомар: Ґрунти України* [online] Available at: <https://geomar.land.kiev.ua/soil.html> [Accessed 11 Jun. 2025].
26. *Superagronom: Словник агронома* [online] Available at: <https://superagronom.com/slovník-agronoma> [Accessed 11 Jun. 2025].
27. Позняк, С. (2010). *Ґрунтознавство і географія ґрунтів : підручник*. Львів: ЛНУ імені Івана Франка.
28. *Природа Хмельницької області*. (1980). К. Геренчук, ред. Львів: Вища школа.
29. Лозовінський, П. (2013). *Ґрунтознавство: підручник для екологів*. Київ – Житомир: ПП «Рута».
30. Luma, N., M., Kareem, A., J., Abdulhmeed, E., O. (2016). Mathematical model for estimation the concentration of heavy metals in soil. *Global Journal Of Engineering Science And Researches*, 1, pp. 16-19.

31. McNeill, J., R., Mauldin, E., S. (2025). A Companion to Global Environmental History. Second Edition. *Wiley-Blackwell*, 24, pp. 544.
32. *Chemeurope: Smokeless powder* [online] Available at: [https://www.chemeurope.com/en/encyclopedia/Smokeless\\_powder.html](https://www.chemeurope.com/en/encyclopedia/Smokeless_powder.html) [Accessed 09 Jun. 2025].
33. Beck, A. J., Gledhill, M., Gräwe, U., Kampmeier, M., Eggert, A., Schlosser, C., Stamer, B., Greinert, J., & Achterberg, E. P. (2025). Widespread environmental contamination from relic munitions in the southwestern Baltic Sea. *Chemosphere*, 372, p1.
34. *NDTV: French Lake Still Riddled With Bombs 80 Years After World War II* [online] Available at: <https://www.ndtv.com/world-news/french-lake-still-riddled-with-bombs-80-years-after-world-war-ii-6641674> [Accessed 09 Jun. 2025].
35. *Science Encyclopedia: Agent Orange Defoliation Damage* [online] Available at: <https://science.jrank.org/pages/119/Agent-Orange-Agent-Orange-defoliation-damage.html> [Accessed 09 Jun. 2025].
36. DisasterHistory: *Yellow River Flood, 1938-47* [online] Available at: <https://disasterhistory.org/yellow-river-flood-1938-47> [Accessed 09 Jun. 2025].
37. Голубцов, О., Сорокіна, Л., Сплодитель, А., Чумаченко, С. (2023). Вплив війни росії проти України на стан українських ґрунтів. Результати аналізу. *ГО «Центр екологічних ініціатив «Екодія»*, [online] pp. 1-32. Available at: <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/zabrudnennia-zemel-vid-rosii-summary.pdf> [Accessed 11 Jun. 2025].
38. Hupy, J.P., Schaetzl, R.J., 2006. Introducing “bombturbation”, a singular type of soil disturbance and mixing. *Soil Sci*, 171, pp. 823–836.
39. *Golos: Національне багатство України – чорноземи – під загрозою знищення* [online] Available at: <https://www.golos.com.ua/article/366511> [Accesses 09 Jun. 2025].

40. *BBC: Ukraine war: Russia accused of using phosphorus bombs in Bakhmut* [online] Available at: <https://www.bbc.com/news/world-europe-65506993> [Accessed 10 Jun. 2025].
41. Tomonaga, M. (2019). The Atomic Bombings of Hiroshima and Nagasaki: A Summary of the Human Consequences, 1945-2018, and Lessons for Homo sapiens to End the Nuclear Weapon Age. *Journal for Peace and Nuclear Disarmament*, 2(2), pp. 491–517.
42. *Atmpshera lab: Hibakujumoku. Nature and its resilience. Restarting from the roots after an atomic bomb* [online] Available at: <https://www.atmospherallab.com/en/society/hibakujumoku-nature-and-its-resilience.html> [Accessed 11 Jun. 2025].
43. Webster, S., Byrne, M., Lance, S., et al. (2016). Where the wild things are: Influence of radiation on the distribution of four mammalian species within the Chernobyl Exclusion Zone. *Frontiers in Ecology and The Environment*, 14(4), pp. 4-5.
- 44.

## ДОДАТКИ

## Додаток А

Таблиця А. Результати біотестування салату посівного (*Lactuca sativa L.*)

Варіант	Кількісні показники							
	Негативна контрольна група	Позитивна контрольна група	Пр№1	Пр№2	Пр№3	К№4	К№5	К№6
Висота рослини, см	8,5	5,4	9,1	3,4	8,2	11,6	7,1	6,3
	7,2	6,1	10,4	6,6	5,7	8,2	9,1	8,3
	8,3	2,1	5,3	4	6,5	8,6	11,7	6,6
	8,3	5,7	7,2	4,6	4,1	8,8	8,3	4
	8,1	6,5	10,2	4,5	4	8,6	10,3	4
	8,7	4,6	10	5	6,3	8,7	9,7	5
	3	5,1	8,6	5,4	5	3,5	9,9	-
	7,5	2,8	9,8	-	-	8,2	10,5	-
	7	-	-	-	-	6,9	9,5	-
	1,1	-	-	-	-	-	-	-
Довжина корінця, см	2,7	1,8	3,4	0,5	2,8	3,8	3,1	3,2
	1,5	0,3	3,4	1,8	1,7	1,4	3,6	3
	3,2	0,2	1,2	0,7	0,5	3,3	4,9	0,8
	2,6	0,6	3,2	0,5	0,8	1,5	2,4	0,8
	3,9	1,8	4,6	0,6	0,7	2,5	4,1	0,3
	1,9	0,3	3	0,4	2,4	1,5	2,5	2
	0,4	1,2	2,5	1	2,7	1,2	2,7	-
	1,5	0,3	3,7	-	-	1,2	3,8	-
	2,7	-	-	-	-	2,1	2,2	-
	0,4	-	-	-	-	-	-	-

## Продовження таблиці А

Біомас а, г	0,005	0,004	0,010	0,005	0,008	0,026	0,018	0,010
	0,006	0,009	0,012	0,006	0,009	0,016	0,013	0,020
	0,005	0,002	0,004	0,006	0,015	0,018	0,035	0,012
	0,001	0,010	0,005	0,005	0,009	0,027	0,018	0,008
	0,001	0,007	0,009	0,005	0,001	0,015	0,018	0,006
	0,008	0,006	0,011	0,007	0,012	0,026	0,017	0,014
	0,003	0,005	0,009	0,005	0,006	0,009	0,034	-
	0,006	0,001	0,012	-	-	0,018	0,022	-
	0,009	-	-	-	-	0,015	0,044	-
	0,001	-	-	-	-	-	-	-

## Додаток Б

Таблиця Б. Фітотоксичний ефект досліджуваних проб ґрунту

Варіант		Проба 30 см	Проба 60 см	Проба 90 см
ФЕ за схожістю, %	Негативний контроль	20	20	20
	Контрольна група №1	11,1	22,2	22,2
	Контрольна група №2	11,1	22,2	22,2
	Контрольна група №3	33,3	16,6	16,6
ФЕ за довжиною корінців, %	Негативний контроль	50,2	62,2	20,3

Продовження таблиці Б

	Контрольна група №1	52,02	61,7	19,3
	Контрольна група №2	4,01	75,8	49,09
	Контрольна група №3	8,6	53,3	1,5
ФЕ за висотою рослини, %	Негативний контроль	30,8	29,3	16,01
	Контрольна група №1	8,6	41,07	29,9
	Контрольна група №2	7,7	49,9	40,5
	Контрольна група №3	54,8	16,04	0,2
ФЕ за біомасою рослини, %	Негативний контроль	-100	-23,8	-90,5
	Контрольна група №1	52,3	70,5	54,6
	Контрольна група №2	63	77,1	64,7
	Контрольна група №3	2	52,2	26,5