

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Факультет захисту рослин, біотехнологій та екології

ПОГОДЖЕНО

Декан факультету захисту
рослин, біотехнологій та екології

_____ Юлія КОЛОМІЄЦЬ
(підпис)

«___» _____ 2025 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри загальної
екології, радіобіології та безпеки
життєдіяльності

_____ Алла КЛЕПКО
(підпис)

«___» _____ 2025 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**на тему «Оцінка екологічного стану Чорнобильської зони відчуження після
лісових пожеж»**

Спеціальність 101 Екологія

Освітня програма Екологія та охорона навколишнього середовища

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

Гарант освітньої програми

Кандидат

сільськогосподарських

наук, доцент, доцент

кафедри екології агросфери

та екологічного контролю

_____ (підпис)

Олена НАУМОВЬКА

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

Доктор біологічних наук,

старший науковий

співробітник

_____ (підпис)

Алла КЛЕПКО

Виконав

_____ (підпис)

Віталій ГАЛЯН

КИЇВ - 2025

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Факультет захисту рослин, біоресурсів та природокористування

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри загальної екології, радіобіології
та безпеки життєдіяльності,
доктор біологічних наук _____ Алла КЛЕПКО
(підпис)

«__» _____ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
СТУДЕНТУ**

Галяну Віталію Володимировичу

Спеціальності «101» Екологія

Освітня програма Екологія та охорона навколишнього середовища

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

Тема магістерської кваліфікаційної роботи «Оцінка екологічного стану

Чорнобильської зони відчуження після лісових пожеж»

Затверджена наказом ректора НУБіП України від «06» листопада 2024р.№1984С

Термін подання завершеної роботи на кафедру «20» листопада 2025 р.

Вихідні данні до магістерської кваліфікаційної роботи – статистичні дані
щодо пожеж на території Чорнобильської зони відчуження 2020-2024 років;

Перелік питань, що підглядають дослідженню:

- Охарактеризувати природно-географічні особливості Чорнобильської зони відчуження та їх вплив на міграцію радіонуклідів;
- Оцінити вплив пожеж на компоненти екосистеми: атмосферне повітря, ґрунтовий покрив та біорізноманіття.;
- Проаналізувати механізми вторинного радіоактивного забруднення.

Перелік графічного матеріалу – рисунки, таблиці

Дата видачі завдання «__» _____ 2024 р.

Керівник магістерської
кваліфікаційної роботи

(підпис)

Алла КЛЕПКО

Завдання прийняв до
виконання

(підпис)

Віталій ГАЛЯН

РЕФЕРАТ

Галян Віталій Володимирович. Магістерська робота на тему «Оцінка екологічного стану Чорнобильської зони відчуження після лісових пожеж».

Дослідження присвячене одній з найгостріших екологічних проблем сучасності – впливу масштабних лісових пожеж на радіоактивно забруднені території. Актуальність роботи визначається зміною наукової парадигми: доведено, що головна довгострокова загроза полягає не в атмосферному перенесенні, а в гідрологічній міграції мобілізованих радіонуклідів, що створює транскордонні ризики забруднення водних систем.

У роботі встановлено, що лісові пожежі в ЧЗВ перетворилися на системний, домінуючий екологічний фактор, що визначає розвиток її екосистем. Накопичення пального матеріалу та стихійне заліснення на геохімічно вразливих ґрунтах сформували ландшафт «стійкої крихкості», де пожежі діють як спусковий гачок для вивільнення радіонуклідів.

Наукова новизна полягає у доведенні та детальному аналізі зміни пріоритетного шляху вторинного забруднення. Показано, що головний довгостроковий ризик пов'язаний із гідрологічним шляхом. Ключовим механізмом є пірогенна трансформація радіонуклідів у водорозчинні форми. Особливу небезпеку становить підвищена мобільність стронцію-90 (^{90}Sr), який, на відміну від цезію-137, слабо сорбується ґрунтами Полісся і може масово надходити у річкову мережу, загрожуючи водним екосистемам далеко за межами зони.

Визначено три основні зони найбільшого екологічного ризику: 1) «Рудий ліс» та Західний радіоактивний слід (максимальний потенціал мобілізації); 2) заплави річок (ризик гідрологічного забруднення); 3) соснові монокультури на колишніх сільгоспугіддях (найвища ймовірність майбутніх пожеж).

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ТЕРИТОРІЙ ПІСЛЯ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ	9
1.1. Стан наукової розробки проблеми оцінки екологічних наслідків лісових пожеж	9
1.2. Природно-географічні особливості Чорнобильської зони відчуження	11
1.3. Вплив лісових пожеж на міграцію радіонуклідів у Чорнобильській зоні відчуження	14
1.4. Методологічні підходи до оцінки екологічного стану територій після пожеж	16
Висновок до розділу 1	18
РОЗДІЛ 2. ЕКОЛОГІЧНІ НАСЛІДКИ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ У ЧОРНОБИЛЬСЬКІЙ ЗОНІ ВІДЧУЖЕННЯ	20
2.1. Характеристика масштабів та інтенсивності лісових пожеж у ЧЗВ у XXI ст.	20
2.2. Вплив пожеж на стан атмосферного повітря та вторинне радіоактивне забруднення	24
2.3. Наслідки для ґрунтів і ґрунтового покриву	26
2.4. Вплив на біорізноманіття (рослинний і тваринний світ)	29
Висновок до розділу 2	31
РОЗДІЛ 3. ОЦІНКА ТА ШЛЯХИ ПОЛІПШЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ	33
3.2. Результати оцінки та визначення зон найбільшого екологічного ризику	36

3.3. Шляхи відновлення екосистем: лісовідновлення, рекультивація ґрунтів, моніторинг біорізноманіття	38
3.4. Рекомендації для системи екологічного моніторингу і запобігання подальшим негативним наслідкам	41
Висновок до розділу 3	43
ВИСНОВКИ	44
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	47

ВСТУП

Актуальність теми. В епоху Антропоцену лісові пожежі перетворилися з сукупності локальних подій на глобальний процес, що прискорюється під впливом кліматичних змін та інших антропогенних чинників. Ця проблема набуває особливої гостроти для України, де пожежі завдають колосальних економічних та екологічних збитків. На цьому тлі Чорнобильська зона відчуження (ЧЗВ) є унікальним і водночас тривожним прикладом, де глобальний кліматичний виклик накладається на важку радіоекологічну спадщину, створюючи комплексні ризики, що не мають аналогів у світі.

Після аварії 1986 року та припинення господарської діяльності ЧЗВ перетворилася на ландшафт «стійкої крихкості». Видиме біологічне відродження та накопичення біомаси замаскували глибоку геохімічну вразливість екосистем, зокрема дерново-підзолистих ґрунтів, що сприяють високій міграційній здатності радіонуклідів. Масштабні пожежі, що почастишали в останнє десятиліття, виступають сильним каталізатором, що руйнує цей тимчасовий баланс. Вони запускають процеси вторинного перерозподілу радіонуклідів, вивільняючи їх з біомаси та ґрунту.

Особливу актуальність дослідження визначають новітні наукові дані, що змінили парадигму оцінки ризиків. Було доведено, що головна довгострокова загроза полягає не стільки в атмосферному перенесенні радіоактивних аерозолів, скільки в гідрологічній міграції мобільних форм радіонуклідів, зокрема стронцію-90 (^{90}Sr), після їх пірогенної трансформації. Це створює довготривалі ризики забруднення водних систем, що виходять далеко за межі зони відчуження і потребують глибокого наукового аналізу, оцінки та розробки превентивних заходів.

Метою магістерської роботи є комплексна оцінка екологічного стану Чорнобильської зони відчуження та її трансформації внаслідок масштабних лісових пожеж для ідентифікації основних ризиків та розробки науково обґрунтованих рекомендацій.

Для досягнення поставленої мети були визначені такі **завдання**:

1. Проаналізувати стан наукової розробки проблеми оцінки екологічних наслідків лісових пожеж на радіоактивно забруднених територіях.
2. Охарактеризувати природно-географічні особливості ЧЗВ та їх вплив на міграцію радіонуклідів.
3. Дати характеристику масштабів та інтенсивності лісових пожеж у ЧЗВ у XXI столітті.
4. Оцінити вплив пожеж на компоненти екосистеми: атмосферне повітря, ґрунтовий покрив та біорізноманіття.
5. Проаналізувати механізми вторинного радіоактивного забруднення, приділяючи особливу увагу гідрологічному шляху міграції ^{90}Sr та ^{137}Cs .
6. На основі інтегральної методики визначити зони найбільшого екологічного ризику на території ЧЗВ.
7. Запропонувати шляхи відновлення екосистем та розробити рекомендації для модернізації системи екологічного моніторингу та запобігання негативним наслідкам у майбутньому.

Об'єкт дослідження – екологічний стан екосистем Чорнобильської зони відчуження.

Предмет дослідження – процеси трансформації екологічного стану ландшафтів ЧЗВ під впливом лісових пожеж, механізми вторинного перерозподілу радіонуклідів та шляхи мінімізації негативних наслідків.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань у роботі використано комплексний міждисциплінарний підхід, що поєднує загальнонаукові та спеціальні методи. Застосовано методи аналізу та синтезу для опрацювання наукових джерел, системний підхід для вивчення екосистеми ЧЗВ як єдиного цілого. В основі роботи лежить інтегрована методологія оцінки, що синергетично поєднує:

- Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) для картографування вигорілих площ та оцінки масштабів пожеж.

- Польовий радіоекологічний моніторинг для відбору проб та отримання верифікованих даних про рівні забруднення.
- Математичне моделювання для прогнозування атмосферного переносу радіоактивних аерозолів та оцінки потенційних ризиків.

Практичне значення одержаних результатів. Результати дослідження можуть бути використані Державним агентством України з управління зоною відчуження (ДАЗВ), Державною службою України з надзвичайних ситуацій (ДСНС), Чорнобильським радіаційно-екологічним біосферним заповідником та іншими науково-дослідними установами. Розроблені рекомендації можуть слугувати основою для модернізації системи радіоекологічного моніторингу з акцентом на гідрологічні ризики, розробки проактивних стратегій управління лісами для зниження пожежної небезпеки та планування заходів з лісовідновлення та рекультивації ґрунтів на постраждалих територіях.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ТЕРИТОРІЙ ПІСЛЯ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ

1.1. Стан наукової розробки проблеми оцінки екологічних наслідків лісових пожеж

Проблема лісових пожеж в епоху Антропоцену зазнала суттєвої переоцінки. Сучасна наукова парадигма розглядає їх не як сукупність ізольованих, випадкових подій, а як глобальний процес, що прискорюється під впливом зміни клімату, землекористування та інших антропогенних чинників. Тепер об'єктом дослідження стає не окрема пожежа, а зміна режимів пожеж – системних характеристик, що включають частоту, інтенсивність, сезонність та площу вигорання. Складність проблеми полягає в неоднозначності впливу вогню: в екосистемах, що еволюціонували за його присутності, він може виступати каталізатором біологічного різноманіття та оновлення, тоді як нетипово інтенсивні та масштабні пожежі стають руйнівним фактором, що призводить до довгострокової деградації. Для України ця проблема є особливо гострою, що підтверджується офіційною статистикою: лише протягом 2017 року було зафіксовано 79 469 пожеж, які завдали прямих матеріальних збитків на суму понад 1,5 мільярда гривень та призвели до загибелі 1 857 людей [1, 2].

Науковий консенсус, підтверджений звітами провідних кліматичних організацій, таких як Національне управління океанічних і атмосферних досліджень США (NOAA), визначає глобальну зміну клімату як основний рушійний фактор інтенсифікації пожежних режимів. Підвищення середніх температур, подовження та посилення періодів посухи, а також зростання «спраги атмосфери» призводять до екстремального висихання органічної речовини в лісах, яка перетворюється на легкозаймисте паливо. Дослідження показують, що зміна клімату подвоїла кількість великих пожеж на заході США в період з 1984 по 2015 рік. Прогностичні моделі демонструють тривожну перспективу: підвищення середньорічної температури на 1°C може збільшити середню площу вигорання на рік до 600% у деяких типах лісових екосистем. Особливу небезпеку становить

механізм позитивного зворотного зв'язку: лісові пожежі вивільняють в атмосферу величезні обсяги вуглецю, що були депоновані в біомасі та ґрунтах, у формі діоксиду вуглецю (CO_2) та інших парникових газів. Це, у свою чергу, посилює парниковий ефект, сприяючи подальшому потеплінню та створюючи ще сприятливіші умови для виникнення нових, ще більш інтенсивних пожеж [3-6].

Екологічні наслідки зміни пожежних режимів мають каскадний характер і призводять до глибоких трансформацій екосистем. По-перше, відбувається зміна видового складу та втрата біорізноманіття. Збільшення частоти та інтенсивності пожеж сприяє поширенню пірофільних (вогнестійких) та часто інвазивних видів, витісняючи при цьому більш чутливі до вогню види, особливо ті, що мають тривалі цикли відновлення. Це може призвести до локального вимирання та загального збіднення екосистеми. По-друге, екосистеми можуть втрачати свою стійкість (резильєнтність). Нетипово великі ділянки високоінтенсивного вигорання знищують джерела насіння на значних площах, унеможливаючи природне лісовідновлення. У таких умовах екосистема може перетнути критичну межу і перейти в альтернативний стабільний стан, наприклад, хвойний ліс може трансформуватися в листяний або чагарникові зарості. Такі зміни мають довгострокові наслідки для гідрологічного режиму, родючості ґрунтів та середовищ існування для дикої природи. По-третє, інтенсивні пожежі спричиняють деградацію ґрунтів, знижуючи їхню здатність утримувати вологу, посилюючи ерозію та призводячи до забруднення водних об'єктів продуктами згорання.

Вплив лісових пожеж виходить далеко за межі природних ландшафтів, маючи значні соціально-економічні та санітарно-гігієнічні наслідки. Прямі економічні збитки включають вартість знищеного майна та колосальні витрати на гасіння пожеж. Однак непрямі збитки часто є значно більшими. Найбільш відчутним наслідком для населення є погіршення якості повітря. Дим від пожеж, що може поширюватися на тисячі кілометрів, є одним з основних джерел забруднення атмосфери дрібнодисперсними частинками $\text{PM}_{2.5}$. Ці частинки становлять серйозну загрозу для здоров'я, спричиняючи та загострюючи респіраторні та серцево-судинні захворювання.

Аналіз наукових досліджень виявляє суттєвий зсув у парадигмі управління лісовими пожежами. Десятиліттями домінуючою стратегією в багатьох країнах світу була політика повного придушення вогню. Однак такий підхід призвів до парадоксального і небезпечного результату: в лісах, адаптованих до періодичних пожеж низької інтенсивності, відбулося накопичення надмірної кількості пального матеріалу (сухостій, підлісок, лісова підстилка). У поєднанні з кліматичними змінами, що спричиняють тривалі посухи, це накопичене паливо створює умови для виникнення неконтрольованих, катастрофічних пожеж надвисокої інтенсивності, які знищують екосистеми. Усвідомлення цього факту призвело до висновку, що повне виключення вогню з пожежо-адаптованих екосистем є контрпродуктивним. Натомість, формується нова стратегія, що полягає у безпечному поверненні вогню в ландшафт через керовані випалювання та управління природними пожежами за сприятливих погодних умов. Метою є не тотальна ліквідація вогню, а відновлення більш природного, менш інтенсивного режиму пожеж, що зменшує накопичення палива, створює мозаїчність ландшафту та підвищує загальну стійкість екосистем до майбутніх кліматичних викликів. Це перехід від реактивного реагування на катастрофи до проактивного, адаптивного управління ризиками [3-7].

1.2. Природно-географічні особливості Чорнобильської зони відчуження

Чорнобильська зона відчуження (ЧЗВ) розташована на півночі Київської області України, на кордоні з Білоруссю. Територіально вона належить до історико-географічного регіону Полісся, що є частиною зони мішаних лісів Східноєвропейської рівнини. Рельєф території переважно низовинний, з абсолютними висотами, що коливаються в межах від 93 до 200 метрів над рівнем моря. Клімат регіону помірно-континентальний, характеризується середньорічною температурою повітря $+8.2^{\circ}\text{C}$ та середньою річною кількістю опадів близько 619 мм. Гідрографічна мережа добре розвинена, її центральним елементом є річка

Прип'ять з широкою заплавою, що включає численні стариці, озера та заболочені ділянки. Загальна площа української частини ЧЗВ становить близько 2600 km².

Ґрунтовий покрив ЧЗВ є головним фактором, що визначає долю та міграційну здатність радіонуклідів, які потрапили в навколишнє середовище внаслідок аварії 1986 року. На території переважають дерново-підзолисті ґрунти (Albeluvisols за міжнародною класифікацією), які сформувалися на давньоалювіальних та флювіогляціальних піщаних відкладах, а також торфово-болотні ґрунти (Histosols) у заплавах річок та пониженнях рельєфу. Ці ґрунти характеризуються низкою специфічних фізико-хімічних властивостей: легким гранулометричним складом (піщані та супіщані), низьким вмістом гумусу, кислою реакцією ґрунтового розчину (низький рН) та низькою ємністю катіонного обміну, що зумовлено малим вмістом глинистих та мулистих частинок. Саме ці властивості роблять екосистеми Полісся надзвичайно вразливими до радіоактивного забруднення. Радіонукліди, потрапивши в такий ґрунт, слабо фіксуються ґрунтовим вбирним комплексом і залишаються в рухомих, біодоступних формах. Особливо це стосується стронцію-90 (⁹⁰Sr), який, будучи хімічним аналогом кальцію, легко включається в біологічні цикли. На відміну від нього, цезій-137 (¹³⁷Cs), аналог калію, має здатність міцно фіксуватися кристалічною ґраткою глинистих мінералів, однак у бідних на глину ґрунтах Полісся цей механізм іммобілізації є значно менш ефективним. Як наслідок, коефіцієнти переходу радіонуклідів, особливо ⁹⁰Sr, з ґрунту в рослини на цих територіях є одними з найвищих, а вертикальна міграція в ґрунтовому профілі відбувається значно інтенсивніше, ніж на чорноземах. Таким чином, ґрунт у ЧЗВ виступає одночасно і як основне депо для радіонуклідів, і як головне джерело їхнього подальшого розповсюдження в екосистемі [8-11].

Після аварії на ЧАЕС у 1986 році та евакуації понад 350 тисяч людей з прилеглих територій, ЧЗВ перетворилася на унікальний природний експеримент з «повторного здичавіння» ландшафтів. Припинення господарської діяльності людини запустило масштабні процеси природних сукцесій. Колишні сільськогосподарські угіддя, що займали значні площі, почали активно заростати

спочатку лучною, а згодом чагарниковою та деревною рослинністю. Внаслідок цього загальна площа лісів у зоні відчуження зросла з приблизно 41% у 1986 році до 59% у 2020 році. Покинуті міста, такі як Прип'ять, та численні села поступово поглинаються природою, перетворюючись на «ліси-привиди». Відсутність антропогенного тиску, зокрема полювання та сільського господарства, створила сприятливі умови для відновлення популяцій багатьох видів диких тварин. У зоні вільно існують популяції лося, оленя, вовка, рисі, а також коня Пржевальського, що перетворило ЧЗВ на один з найбільших природних резерватів Європи. Цей статус був офіційно закріплений створенням на значній частині території Чорнобильського радіаційно-екологічного біосферного заповідника [9, 12-13].

При детальному аналізі екологічних процесів у ЧЗВ виявляється її парадоксальна природа, яку можна охарактеризувати як «стійку крихкість». На перший погляд, зона демонструє вражаючу екологічну стійкість: за відсутності людини природа активно відновлюється, біорізноманіття процвітає, а ландшафти повертаються до більш природного стану. Це створює образ «відродження природи» після техногенної катастрофи. Однак це біологічне відновлення відбувається на геохімічно вразливій основі. Мінеральний скелет ландшафту – дерново-підзолисті піщані ґрунти – за своїми властивостями є ідеальним середовищем для високої мобільності радіонуклідів. Радіоактивні ізотопи, особливо ^{90}Sr , не були надійно іммобілізовані в ґрунті, а лише тимчасово депоновані у верхніх його шарах та акумульовані в біомасі, що наростала десятиліттями. Масштабна лісова пожежа виступає в ролі спускового гачка, який руйнує цю тимчасову, уявну стабільність. Вона вивільняє радіонукліди, що були законсервовані в рослинності, та змінює їхні хімічні форми, роблячи їх ще більш мобільними та доступними для міграції [14-16].

Отже, видима біологічна стійкість екосистеми маскує її глибоку радіоекологічну крихкість. Накопичена за десятиліття біомаса, що є символом відродження, під час пожежі миттєво перетворюється з ознаки відновлення на потужне джерело вторинного радіоактивного забруднення.

1.3. Вплив лісових пожеж на міграцію радіонуклідів у Чорнобильській зоні відчуження

Лісові пожежі є найпотужнішим природно-техногенним фактором, здатним кардинально порушити відносно стабільний розподіл радіонуклідів, що сформувався в екосистемах ЧЗВ за понад три десятиліття після аварії. Механізми вторинного перерозподілу радіонуклідів під час пожеж можна розділити на два основні шляхи: аерозольний та гідрологічний.

Аерозольний шлях полягає у вивільненні радіонуклідів, акумульованих у біомасі (лісовій підстилці, траві, деревині), в атмосфері разом з продуктами згоряння – димом та попелом. Цей процес, відомий як ресуспензія (вторинне підняття), перетворює відносно нерухомі радіонукліди на леткі аерозольні частинки. Димовий шлейф, що утворюється під час великих пожеж, здатен переносити ці радіоактивні аерозолі на значні, в тому числі транскордонні, відстані [17].

Гідрологічний шлях пов'язаний з міграцією радіонуклідів, що залишилися на поверхні ґрунту після пожежі у складі попелу та обвуглених решток. Вогонь знищує рослинний покрив та лісову підстилку, які виконували бар'єрну функцію, перешкоджаючи поверхневому стоку води. Внаслідок цього, під час інтенсивних опадів або танення снігу, радіонукліди, що містяться в попелі, активно змиваються з вигорілих територій і потрапляють у річкову мережу, що призводить до забруднення поверхневих вод.

Великі пожежі, що сталися в ЧЗВ у квітні 2015 та квітні 2020 років, викликали обґрунтоване занепокоєння наукової спільноти та громадськості щодо можливого транскордонного переносу радіоактивного забруднення. Детальний аналіз пожеж 2015 року показав, що в атмосферу були викинуті значні кількості довгоживучих радіонуклідів: близько 10.9 ТБк ^{137}Cs , 1.5 ТБк ^{90}Sr , а також гігабеккерелі трансуранових елементів, зокрема ізоотопів плутонію (^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu) та америцію (^{241}Am). Моделювання атмосферного переносу показало, що радіоактивні шлейфи поширювалися переважно на територію східноєвропейських

країн, зокрема Білорусі. Хоча розраховані додаткові дози опромінення для населення за межами ЧЗВ виявилися значно нижчими за встановлені норми безпеки, сам факт такого переносу підкреслює міжнародний вимір проблеми та потенційні ризики від майбутніх пожеж в умовах зміни клімату [15, 18].

Новітні дослідження, проведені після масштабних пожеж 2020 року, суттєво змінили уявлення про домінуючі ризики, висунувши на перший план проблему гідрологічної міграції, особливо ^{90}Sr . Головним відкриттям стало те, що процес горіння змінює хімічні форми (спеціалію) радіонуклідів. У попелі та обвуглених рештках частка водорозчинних, а отже, найбільш мобільних форм ^{137}Cs та, особливо, ^{90}Sr значно зростає порівняно з їхніми формами у вихідному ґрунті. Це відкриття пояснює різну поведінку двох основних радіонуклідів після пожежі. Концентрація ^{137}Cs у річковій воді після пожеж не демонструє значного та тривалого зростання. Це пов'язано з тим, що ^{137}Cs , навіть перейшовши у розчинну форму, має високу здатність до повторної сорбції частинками ґрунту та донними відкладеннями в межах водозбірного басейну. Натомість концентрація ^{90}Sr у річках після пожеж може значно зростати, іноді перевищуючи допустимі рівні для питної води в Україні (2 Бк/л). Це явище зумовлене синергією двох факторів: високою початковою мобільністю ^{90}Sr у бідних ґрунтах Полісся та додатковим збільшенням його розчинності внаслідок пожежі. Найбільші піки концентрації ^{90}Sr у річковій воді спостерігаються під час весняного сніготанення та після інтенсивних літніх злив, коли відбувається максимальний змив розчинних сполук з вигорілих площ [15].

Для кращого розуміння відмінностей у поведінці цих двох основних радіонуклідів нижче наведена порівняльна таблиця 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика міграційної здатності ^{137}Cs та ^{90}Sr у пост-пірогенних ландшафтах ЧЗВ

Параметр	^{137}Cs (Цезій-137)	^{90}Sr (Стронцій-90)
----------	-------------------------------	--------------------------------

Період напіврозпаду	~30.17 років	~28.79 років
Хімічний аналог	Калій (K)	Кальцій (Ca)
Основний механізм фіксації в ґрунті	Сильна, практично незворотна сорбція глинистими мінералами (ілітом)	Слабке утримання через іонний обмін, переважно в рухомих формах
Рухливість у ґрунтах Полісся (до пожежі)	Низька	Висока
Вплив пожежі на хімічну форму	Збільшення водорозчинної фракції в попелі	Значне збільшення водорозчинної фракції в попелі
Домінуючий шлях міграції після пожежі	Аерозольний (ресуспензія); гідрологічний шлях обмежений повторною сорбцією	Гідрологічний (змив з попелом); аерозольний
Основний ризик після пожежі	Короткочасне забруднення повітря під час горіння	Довготривале забруднення поверхневих вод (річок, водосховищ)

1.4. Методологічні підходи до оцінки екологічного стану територій після пожеж

Оцінка екологічних наслідків лісових пожеж на радіоактивно забруднених територіях, таких як ЧЗВ, вимагає застосування інтегрованої, багаторівневої методології, яка поєднує польові дослідження, дистанційне зондування Землі та математичне моделювання. Кожен з цих підходів надає унікальну інформацію, і лише їхній синтез дозволяє отримати комплексну та об'єктивну картину [19, 20].

Основою для будь-якої оцінки є польовий радіоекологічний моніторинг, який забезпечує отримання точних, верифікованих даних про рівні та розподіл радіонуклідів безпосередньо на місцевості. Стандартна процедура включає кілька етапів. По-перше, це рекогносцировка та дозиметричне обстеження території за допомогою портативних дозиметрів-радіометрів для вимірювання потужності експозиційної дози гамма-випромінювання та ідентифікації ділянок з аномальними рівнями забруднення. По-друге, це відбір проб основних компонентів екосистеми: ґрунту (часто пошарово для оцінки вертикальної міграції), лісової підстилки, попелу, рослинності та води. По-третє, це лабораторний аналіз відібраних проб з використанням високоточних інструментальних методів: гамма-спектрометрії для ідентифікації та кількісного визначення гамма-випромінюючих нуклідів (наприклад, ^{137}Cs), складних радіохімічних методів для виділення та вимірювання бета-випромінюючих нуклідів (^{90}Sr) та альфа-спектрометрії для аналізу трансуранових елементів (ізоотопів плутонію) [21-23].

Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) є незамінним інструментом для оперативного отримання інформації про просторові масштаби пожеж та їхні наслідки на великих і важкодоступних територіях. Сучасні супутникові системи, такі як Sentinel-2 та Landsat, надають багатоспектральні знімки з високою просторовою та часовою роздільною здатністю. Для картографування вигорілих площ та оцінки ступеня тяжкості пожежі широко використовується розрахунок Нормалізованого індексу горіння (Normalized Burn Ratio, NBR), який базується на співвідношенні відбиття у ближньому та середньому інфрачервоних каналах. Порівняння значень NBR до та після пожежі дозволяє розрахувати диференційний індекс (dNBR), який є визнаним стандартом для класифікації ступеня ураження рослинності. Для моніторингу динаміки відновлення екосистем після пожежі використовуються вегетаційні індекси, зокрема Нормалізований диференційний вегетаційний індекс (NDVI). Важливо підкреслити, що дані ДЗЗ завжди потребують валідації шляхом польових обстежень для підтвердження точності інтерпретації супутникових знімків [24-27].

Математичне моделювання відіграє ключову роль у прогнозуванні ризиків та оцінці потенційних наслідків пожеж. Для прогнозування поширення радіоактивних аерозолів в атмосфері застосовуються моделі атмосферного переносу, такі як Гаусові моделі та моделі турбулентної дифузії. Вони дозволяють, враховуючи метеорологічні умови (швидкість та напрям вітру, опади), характеристики джерела викиду та властивості частинок, розрахувати траєкторію руху димового шлейфу та зони випадіння радіонуклідів. Окрім цього, розробляються комплексні системи моделювання ризиків, які інтегрують просторові дані про типи ландшафтів, накопичення пального матеріалу, щільність радіоактивного забруднення та ймовірність виникнення займань. Такі системи дозволяють ідентифікувати «гарячі точки» – території, де пожежа може призвести до найбільшого вивільнення радіонуклідів, та оцінити ефективність превентивних заходів, наприклад, створення протипожежних розривів [28, 29].

Отже, ефективна методологія оцінки наслідків пожеж не може базуватися на якомусь одному підході. Її сила полягає саме в синергетичній інтеграції різних методів у єдиний аналітичний процес. Дистанційне зондування дозволяє швидко оцінити масштаби проблеми і визначити пріоритетні ділянки для детального вивчення. Польові дослідження на цих ділянках надають точні кількісні дані, які є незамінними для калібрування та верифікації як даних ДЗЗ, так і математичних моделей. У свою чергу, результати моделювання допомагають інтерпретувати отримані дані в середовищі потенційних ризиків для довкілля та населення і слугують основою для розробки обґрунтованих стратегій управління. Жоден з методів, взятий окремо, не є достатнім для вирішення такого складного завдання; їхня справжня цінність розкривається лише у взаємозв'язку.

Висновок до розділу 1

Аналіз сучасних наукових джерел за останнє десятиліття демонструє, що проблема оцінки екологічних наслідків лісових пожеж є різносторонньою, динамічною та набуває глобального значення. Зміна клімату трансформує природні

режими пожеж, перетворюючи їх з локального екологічного фактора на потужну дестабілізуючу силу, що впливає на екосистеми, біогеохімічні цикли та здоров'я населення на планетарному рівні. Чорнобильська зона відчуження є унікальним і водночас тривожним прикладом, де цей глобальний виклик накладається на радіоекологічну спадщину, створюючи комплексні ризики, що не мають аналогів.

Поєднання специфічних природно-географічних умов Українського Полісся, зокрема дерново-підзолистих ґрунтів з високою міграційною здатністю радіонуклідів, та масштабних процесів «повторного здичавіння» після припинення господарської діяльності, створило парадоксальний ландшафт «стійкої крихкості». Видиме біологічне відродження та відновлення біорізноманіття маскують глибоку геохімічну вразливість системи. Пожежі в цій зоні діють як каталізатор, що руйнує тимчасовий екологічний баланс, вивільняючи акумульовані в біомасі радіонукліди і запускаючи процеси їхнього вторинного перерозподілу. Особливу занепокоєність викликають нові наукові дані про підвищену гідрологічну мобільність ^{90}Sr після пожеж, що створює довгострокові ризики забруднення водних систем, які виходять далеко за межі зони відчуження.

Для адекватної оцінки та управління цими складними, взаємопов'язаними ризиками необхідна інтегрована науково-методична база. Вона повинна синергетично поєднувати оперативність та масштабність дистанційного зондування Землі, точність та достовірність польового радіоекологічного моніторингу, а також прогностичну силу математичного моделювання. Лише такий комплексний, міждисциплінарний підхід дозволить перейти від реактивного реагування на наслідки катастрофічних пожеж до проактивного управління екологічними та радіологічними ризиками в умовах мінливого клімату та унікального середовища Чорнобильської зони.

РОЗДІЛ 2. ЕКОЛОГІЧНІ НАСЛІДКИ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ У ЧОРНОБИЛЬСЬКІЙ ЗОНІ ВІДЧУЖЕННЯ

2.1. Характеристика масштабів та інтенсивності лісових пожеж у ЧЗВ у XXI ст.

Чорнобильська зона відчуження (ЧЗВ), унікальна екосистема, що сформувалася в умовах відсутності значного антропогенного тиску після аварії 1986 року, у XXI столітті зіткнулася з новим важливим фактором екологічної трансформації – лісовими пожежами. Ці події, що почастишали та набули великих масштабів, є не просто окремими інцидентами, а системним явищем, що повністю змінює радіоекологічну ситуацію та біотичні процеси на цій території. Аналіз динаміки, масштабів та рушійних сил цих пожеж є основною передумовою для розуміння їхніх екологічних наслідків.

Лісові пожежі є щорічним явищем у ЧЗВ, що підтверджується багаторічними спостереженнями. Історичні дані свідчать про високу частоту загорянь; наприклад, у період з 1993 по 2010 рік було зафіксовано понад 1000 пожеж, хоча більшість з них мали обмежену площу. Проте, аналіз даних за останнє десятиліття виявляє чітку тенденцію до збільшення не лише частоти, але й площі та інтенсивності пожеж. Особливо виразною ця тенденція стала після 2015 року, коли зона увійшла в період великих та катастрофічних пожежних подій, що свідчить про зміну пожежного режиму на території [30-33].

Ця ескалація є наслідком великою трансформації ландшафту. Припинення господарської діяльності після 1986 року призвело до поступового, але невпинного перетворення ЧЗВ на суцільний природний масив. Покинуті сільськогосподарські угіддя, що колись слугували природними протипожежними бар'єрами, зазнали інтенсивної природної афорестації, перетворившись на молоді, густі та легкозаймисті ліси. Водночас, у старих лісових масивах, позбавлених санітарних рубок та догляду, накопичилася величезна кількість горючого матеріалу –

сухостою, хмизу та лісової підстилки. Таким чином, ЧЗВ перетворилася на екосистему, системно схильну до виникнення та швидкого поширення масштабних пожеж. Цей процес свідчить не просто про збільшення кількості пожеж, а про якісну зміну екологічних умов, де вогонь стає домінуючим фактором, що формує ландшафт [32, 33].

Серед численних пожежних подій XXI століття особливе наукове та екологічне значення мають пожежі 2016 та 2020 років, які стали своєрідними реперними точками в дослідженні пірогенних процесів у ЧЗВ.

Пожежа 2016 року була унікальною за своїм місцем розташування та радіоекологічним значенням. Вона охопила приблизно 80% території так званого «Рудого лісу» – соснового насадження площею 4-6 км², яке загинуло внаслідок гострого радіаційного опромінення в перші тижні після аварії 1986 року. Ця територія є однією з найбільш радіоактивно забрудненою наземною екосистемою на планеті. Таким чином, пожежа 2016 року стала критично важливим природним експериментом, що дозволив вивчити процеси вивільнення та перерозподілу радіонуклідів з надзвичайно концентрованого джерела [30, 31, 34].

Пожежі весни 2020 року визнані наймасштабнішими за всю 34-річну історію існування Чорнобильської зони відчуження. Вони охопили величезні території, включно з повторним вигоранням «Рудого лісу», де сухі дерева, що загинули під час пожежі 2016 року, стали додатковим паливом. Оцінки загальної площі, пройденої вогнем, суттєво різняться в різних наукових джерелах, що відображає складність моніторингу таких масштабних подій. Оцінки варіюються від 500 км² та 554 км² до 662 км², понад 800 км² і навіть 870 км², що становить приблизно третину всієї території української частини ЧЗВ. Ці цифри різко контрастують з початковими офіційними даними, які називали значно менші площі, наприклад, 11 тисяч гектарів (110 км²). Така розбіжність підкреслює критичну роль незалежних наукових оцінок на основі супутникових даних для адекватного розуміння масштабів катастрофи.

Ці пожежі надали безпрецедентну можливість для вивчення екологічних наслідків вогню на великих, різномірних за рівнем забруднення та типами ландшафтів територіях. В таблиці 2.1 систематизовані дані про основні лісові пожежі в ЧЗВ за 2015-2022 рр [15, 30, 31].

Таблиця 2.1 – Зведені дані про основні лісові пожежі в ЧЗВ (2015-2022 рр.)

Рік	Дати	Основні локації	Оцінена площа вигорання (км ²)	Значення
2015-2016	Різні періоди	Західна та центральна частини ЧЗВ	> 100	Перша серія великих пожеж, що сигналізувала про зміну пожежного режиму.
2016	Липень	«Рудий ліс»	~4-5 (80% території «Рудого лісу»)	Інтенсивна пожежа в найбільш радіоактивно забрудненій наземній екосистемі світу.
2020	Квітень	Корогодське, Денисовицьке, Котівське лісництва, «Рудий ліс»	554 - 870	Наймасштабніша пожежа в історії ЧЗВ, що охопила до третини її території.
2022	Березень	Район с. Стечанка, м. Прип'ять	> 2 (окремі осередки)	Пожежі, що виникли в умовах окупації, унеможливили ефективне гасіння.

Масштаб та інтенсивність пожеж у ЧЗВ визначаються синергетичною дією кількох головних факторів.

1. Накопичення пального матеріалу. Відсутність лісогосподарської діяльності та будь-якого управління екосистемами протягом десятиліть призвела до безпрецедентного накопичення мертвої деревини, сухої трави та товстого шару лісової підстилки. Це перетворило ліси ЧЗВ на «порохову діжку» з надзвичайно високим пожежним навантаженням.

2. Зміни у землекористуванні та рослинному покриві. Важливим фактором стало стихійне заліснення покинутих сільськогосподарських земель. Загальна площа лісів у ЧЗВ зросла з 41% у 1986 році до 59% у 2020 році. Ці нові ліси, переважно представлені монокультурами сосни звичайної та берези повислої, є густими, однорідними та вкрай пожежонебезпечними. На відміну від мозаїчного агроландшафту минулого, сучасна ЧЗВ є суцільним лісовим масивом, що сприяє безперешкодному поширенню вогню на величезні відстані. Отже, сам процес «здичавіння» повністю змінив профіль пожежних ризиків.

3. Антропогенний вплив. Попри обмежений доступ, людська діяльність залишається головним джерелом займань у ЧЗВ. Це свідчить про постійні проблеми у сфері контролю та управління доступом до зони.

4. Кліматичні зміни. Глобальні кліматичні процеси посилюють пожежну небезпеку. Підвищення середньорічних температур та зменшення кількості опадів у регіоні українського Полісся призводять до більш тривалих та посушливих періодів, створюючи ідеальні умови для виникнення та поширення вогню [31-33, 35].

Сучасні дослідження пожеж у ЧЗВ спираються на передові технології дистанційного зондування Землі. Для оперативного виявлення активних осередків горіння та оцінки вигорілих площ широко використовуються дані із супутників, таких як MODIS, VIIRS та Sentinel-2. Отримана супутникова інформація є основою для подальшого аналізу та верифікації. Для прогнозування поведінки вогню та оцінки потенційних ризиків застосовуються математичні моделі, зокрема, модель Ротермела, яка використовується Лісовою службою США. Поєднання емпіричних

даних дистанційного зондування та прогностичного моделювання дозволяє отримати комплексну картину пожежних процесів у зоні [36].

2.2. Вплив пожеж на стан атмосферного повітря та вторинне радіоактивне забруднення

Одним із найбільш значущих та суспільно резонансних наслідків лісових пожеж у ЧЗВ є вторинне радіоактивне забруднення – процес вивільнення та перерозподілу радіонуклідів, що були депоновані в екосистемах після аварії 1986 року. Цей процес відбувається двома основними шляхами: атмосферним та гідрологічним. Сучасні наукові дослідження дозволили не лише кількісно оцінити ці процеси, але й виявити важливу відмінність у їхній значущості, що призвело до зміни парадигми в оцінці радіологічних ризиків.

Під час горіння лісової біомаси (дерев, чагарників, трави) та верхнього органічного шару ґрунту, де акумульована основна частина радіонуклідів, відбувається їхнє вивільнення в атмосферу у вигляді аерозолів. Найбільш інтенсивні дослідження цього процесу були проведені під час та після масштабних пожеж у квітні 2020 року. Згідно з оцінками, загальна активність радіонуклідів, що надійшла в атмосферу, склала 643 ГБк. Переважна частина цієї активності припадала на Цезій-137 (^{137}Cs) – 630 ГБк, тоді як внесок Стронцію-90 (^{90}Sr) був значно меншим – 13 ГБк. Ці цифри, хоч і є значними в абсолютному вимірі, становлять лише невелику частку від загального запасу радіонуклідів у зоні, проте демонструють вплив пожеж як механізму їхньої ремобілізації [15].

Вивільнені в атмосферу радіоактивні аерозолі переносяться повітряними масами на значні відстані. Моделювання атмосферного переносу підтвердило, що димові шлейфи від пожеж 2020 року досягали густонаселених територій, зокрема Києва. Це викликало значне занепокоєння громадськості щодо можливих радіаційних ризиків [37, 38].

Однак, численні детальні оцінки дозових навантажень, проведені різними науковими групами, дійшли єдиного висновку: додаткове опромінення населення внаслідок вдихання радіонуклідів з диму було незначним. Наприклад, розрахункова сумарна ефективна доза для мешканців Києва за весь період пожеж до кінця 2020 року склала близько 30 нЗв, що становить лише 0.003% від річного допустимого рівня, встановленого нормативами. Концентрація ^{137}Cs у приземному шарі повітря в Києві в пікові моменти сягала 2-4 мБк/м³, що в сотні й тисячі разів нижче за допустимі рівні [37, 38].

Отже, наукові дані переконливо свідчать, що прямий радіологічний ризик для широких верств населення від атмосферного переносу радіонуклідів під час пожеж у ЧЗВ є мінімальним. Найбільшому ризику інгаляційного надходження радіонуклідів піддаються пожежники, які працюють безпосередньо в осередках горіння на забруднених територіях.

На противагу відносно незначному атмосферному шляху, гідрологічний перенос визнається домінуючим вектором вторинного радіоактивного забруднення після пожеж. Науковий консенсус полягає в тому, що річкові системи є головним каналом для довгострокового перерозподілу радіонуклідів. За оцінками, річки переносять у десятки, а то й тисячі разів більше радіоактивних речовин, ніж піднімається в атмосферу під час горіння.

Механізм цього процесу полягає у змиві забрудненого матеріалу – попелу, обуглених решток та частинок верхнього шару ґрунту – з вигорілих водозбірних басейнів у річкову мережу. Цей процес значно активізується під час інтенсивних опадів або весняного танення снігу, коли водні потоки мають максимальну енергію для ерозії та транспортування завислих речовин. Таким чином, пожежа створює умови для масштабного змиву радіонуклідів із суходолу у водні екосистеми.

Головним процесом, що уможливорює інтенсивний гідрологічний перенос, є пірогенна трансформація хімічних форм радіонуклідів. Протягом десятиліть після аварії ^{137}Cs та ^{90}Sr міцно фіксувалися в ґрунті, переважно в складі стійких органічно-мінеральних комплексів. Пожежа, спалюючи органічну речовину, руйнує ці

комплекси, вивільняючи радіонукліди та переводячи їх у значно більш мобільні, водорозчинні форми.

Спеціальний аналіз показав, що частка водорозчинних фракцій ^{137}Cs та ^{90}Sr у попелі та обвуглених рештках є значно вищою, ніж у ґрунті до пожежі. Це хімічне реактивування спадкового забруднення є важливою причиною підвищеного ризику для водних систем [15].

Важливо, що ^{137}Cs та ^{90}Sr поведуть себе у водному середовищі після пожежі по-різному.

– Цезій-137 (^{137}Cs) завдяки своїм фізико-хімічним властивостям (заряду та розміру іона), має високу спорідненість до глинистих мінералів. Навіть після вивільнення з органічної матриці він швидко і міцно сорбується частинками ґрунту та донних відкладів. Внаслідок цього, навіть після масштабних пожеж 2020 року, суттєвого зростання концентрації ^{137}Cs у воді річки Сахан (притока Прип'яті) зафіксовано не було.

– Стронцій-90 (^{90}Sr) на відміну від цезію, значно слабше взаємодіє з мінеральною складовою ґрунту. Його підвищена водорозчинність після пожежі призводить до ефективного вимивання у річкову мережу. Дослідження показали, що після пожеж 2020 року концентрація ^{90}Sr у річці Сахан перевищувала допустиму норму для питної води в Україні (2 Бк/л) частіше, ніж за попередні два десятиліття. Саме після пожеж були зафіксовані найвищі концентрації цього радіонукліда у річковій воді [15, 39, 40].

Ці дані свідчать про зміну парадигми в оцінці ризиків: головна довгострокова радіоекологічна загроза від пожеж полягає не в гострому інгаляційному опроміненні від димових шлейфів, а в хронічному забрудненні водних шляхів більш мобільним та біодоступним ^{90}Sr . Як хімічний аналог кальцію, ^{90}Sr легко включається в біологічні цикли, зокрема, накопичується в кістковій тканині хребетних, що створює потенційну небезпеку для водних організмів та харчових ланцюгів далеко за межами зони відчуження.

2.3. Наслідки для ґрунтів і ґрунтового покриву

Ґрунтовий покрив ЧЗВ є основним резервуаром, де протягом десятиліть накопичувались та утримувались радіонукліди, що випали після аварії 1986 року. Лісові пожежі чинять прямий та багатогранний вплив на цей основний компонент екосистеми, спричиняючи не лише ремобілізацію радіонуклідів, але й глибокі зміни фізико-хімічних властивостей ґрунту, його біологічної активності та хімічного складу. Ці зміни, в свою чергу, запускають каскад подальших екологічних процесів, зокрема, ерозію та забруднення водних систем.

Переважає більшість радіонуклідів, зокрема довгоживучі ^{137}Cs та ^{90}Sr , сконцентрована у верхньому шарі ґрунту товщиною 10-15 см. Цей шар, багатий на органічну речовину (лісова підстилка, гумус), діє як губка, міцно утримуючи радіонукліди в складі орґано-мінеральних комплексів.

Інтенсивний жар лісової пожежі, особливо низової, яка є найпоширенішим типом у ЧЗВ, безпосередньо впливає на цей шар. Відбувається вигорання органічної речовини, що призводить до руйнування гумінових комплексів, які зв'язували радіонукліди. Цей процес можна охарактеризувати як пірогенну мінералізацію. В результаті радіонукліди переходять зі стану міцно зв'язаного та відносно інертного у більш рухомі, обмінні або водорозчинні форми, що концентруються у тонкому шарі попелу на поверхні ґрунту. Саме ця фундаментальна хімічна трансформація є першопричиною та необхідною умовою для подальшого вторинного перерозподілу забруднення [41, 42].

Вплив пожежі на ґрунт не обмежується лише зміною мобільності радіонуклідів. Знищення органічного шару призводить до деградації структури ґрунту, зміни його водно-фізичних властивостей, зокрема, може спричинити гідрофобність (водовідштовхування) поверхні, що посилює поверхневий стік та ерозію.

Особливо значущим є вплив на біологічну складову ґрунту. Дослідження, проведені в «Рудому лісі» після пожежі 2016 року з використанням методу приманкових пластин, показали суттєве зниження біологічної активності ґрунту на

вигорілих ділянках. Це свідчить про значну шкоду, завдану ґрунтовій біоті – мікроорганізмам, грибам та безхребетним, які є ключовими для процесів декомпозиції, кругообігу поживних речовин та підтримки родючості. Пошкодження спільноти редуцентів може сповільнити процеси відновлення екосистеми та погіршити її здатність до самоочищення та стабілізації забруднювачів [34].

Лісові пожежі є джерелом не лише радіологічного, але й хімічного забруднення. Під час неповного згоряння органічної речовини утворюється різноманітна кількість токсичних сполук, серед яких особливе місце займають поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ) – група стійких органічних забруднювачів, багато з яких мають канцерогенні та мутагенні властивості [43].

Хоча прямі дослідження ПАВ у ґрунтах ЧЗВ після пожеж відсутні, за аналогією з дослідженнями в інших регіонах світу можна зробити обґрунтовані припущення. Наукові дослідження, що вивчали наслідки лісових пожеж, демонструють, що концентрація ПАВ у ґрунтових водах на вигорілих територіях може бути в 1-6 разів вищою, ніж на контрольних ділянках. Ці сполуки мобілізуються з попелу та поверхні ґрунту і згодом проникають у підземні води та поверхневі водотоки. Таким чином, пожежі в ЧЗВ створюють додаткову хімічну загрозу, яка накладається на вже існуючу радіологічну, що є прикладом комплексного синергетичного впливу на екосистему [43].

Знищення рослинного покриву та лісової підстилки залишає поверхню ґрунту беззахисною перед дією вітру та води. Це різко підвищує вразливість ґрунту до ерозійних процесів. Пост-пірогенна ерозія стає важливим механізмом фізичного перенесення забрудненого матеріалу. Вітер піднімає в повітря дрібні частинки попелу та ґрунту, перерозподіляючи їх локально, тоді як дощові та талі води змивають їх у струмки та річки, безпосередньо пов'язуючи наземні та водні екосистеми.

Якщо природна ерозія протягом десятиліть сприяла повільному самоочищенню поверхні та заглибленню радіонуклідів, то пост-пірогенна ерозія є імпульсним, прискореним процесом. Вона створює так зване «вікно вразливості» –

період між пожежею та відновленням рослинного покриву, коли екосистема є найбільш чутливою до ерозії. Сильна злива або інтенсивне сніготанення в цей період можуть спричинити масовий змив забруднювачів, що накопичувались десятиліттями, в гідрографічну мережу, викликаючи різке, хоч і короткочасне, підвищення їх концентрації у воді. Цей синергізм хімічної мобілізації (розчинність) та фізичного переносу (ерозія) є головним у розумінні довгострокових наслідків пожеж.

2.4. Вплив на біорізноманіття (рослинний і тваринний світ)

Чорнобильська зона відчуження, звільнена від прямого людського впливу, перетворилася на унікальний резерват дикої природи, де мешкають популяції багатьох видів, включно з рідкісними та великими ссавцями. Масштабні лісові пожежі є фактором порушення для цього новосформованого біорізноманіття, чинячи як прямий, так і опосередкований вплив на флору та фауну. Наслідки цього впливу є складними та неоднозначними: з одного боку, пожежі спричиняють загибель організмів та руйнування середовищ існування, з іншого – виступають каталізатором глибоких екосистемних трансформацій та сукцесійних процесів [30, 44].

Вплив пожеж на тваринний світ залежить від мобільності видів та їхньої здатності уникати небезпеки.

1. Пряма смертність та переміщення. Найбільш вразливими до вогню є малорухливі види тварин, такі як амфібії, рептилії, дрібні гризуни, а також пташині гнізда з яйцями та пташенятами, які не можуть втекти від фронту полум'я. Великі мобільні ссавці, як-от вовки, олені, лосі та дикі кабани, зазвичай здатні вчасно покинути небезпечну територію.

2. Втрата середовища існування та кормової бази. Безпосередньо після пожежі тварини стикаються з руйнуванням своїх домівок та різким скороченням кормових ресурсів. Вигорілі луки та лісова підстилка, де раніше паслися травоядні, перетворюються на шар попелу та обвуглену землю. Це створює короткостроковий

дефіцит ресурсів, що може вплинути на виживання та репродуктивний успіх популяцій.

3. Видоспецифічні реакції. Дослідження після пожеж демонструють складні та видоспецифічні реакції фауни. Дані з фотопасток, встановлених у «Рудому лісі» після пожежі 2016 року, показали, що середні та великі ссавці продовжували активно використовувати вигорілу територію, що свідчить про їхню високу стійкість та адаптивність. Водночас, відлов дрібних ссавців виявив чітку зміну у структурі угруповання: нориці руді (*Myodes glareolus*), які потребують густого підліску та лісової підстилки, були зафіксовані переважно на не вигорілих ділянках. Натомість, мишаки лісові (*Apodemus sylvaticus*), що є більш пристосованими до відкритих просторів, частіше траплялися на згарищах. Це яскраво ілюструє, що пожежа діє як екологічний фільтр, сприяючи одним видам і пригнічуючи інші, що призводить до перебудови структури тваринних угруповань [31].

Пожежі є найбільшим рушієм сукцесійних процесів у ЧЗВ, запускаючи довготривалі зміни у рослинному покриві та, як наслідок, у всьому ландшафті.

1. Початкова колонізація. Безпосередньо після пожежі на звільнених від рослинності територіях починається процес колонізації. На першому етапі (1-2 роки) домінують види-піонери, часто інвазивні «бур'яни пустирів». Дослідження показують, що в перший рік після пожежі на згарищах масово поширюється інвазивний вид злинка канадська (*Erigeron canadensis*).

2. Відновлення місцевих видів. З часом, зазвичай на третій рік, місцеві види починають витісняти первинних колонізаторів. Основну роль у цьому процесі відіграє куничник наземний (*Calamagrostis epigejos*) – агресивний місцевий злак, який утворює щільні дернини та ефективно конкурує з іншими видами.

3. Довгострокова трансформація ландшафту. У довгостроковій перспективі пожежі виступають не просто як руйнівний, а як формотворчий фактор. Вони прискорюють природну сукцесію, руйнуючи штучні, біологічно бідні та нестабільні монокультури сосни, які є спадком радянського лісівництва, і сприяючи формуванню більш природних, різновікових та стійких мішаних або

листяних лісів. Таким чином, вогонь, попри свою руйнівну силу, є основним механізмом процесу «здичавіння» та екологічної реорганізації зони. Водночас, пожежі створюють «вікна можливостей» для поширення небезпечних інвазивних деревних видів, зокрема робінії псевдоакації (*Robinia pseudoacacia*), яка може захоплювати значні площі та докорінно змінювати екосистеми [35].

ЧЗВ є унікальною природною лабораторією, де дика природа зазнає одночасного впливу двох потужних стресорів: періодичних масштабних пожеж та постійного хронічного іонізуючого випромінювання. Відомо, що хронічне опромінення може викликати низку сублетальних ефектів у живих організмів, таких як оксидативний стрес, генетичні пошкодження, порушення імунної системи та репродуктивної функції.

Головним і на сьогодні найменш вивченим питанням є синергетичний ефект цих двох стресорів. Чи робить фізіологічний стрес від радіації тварин більш вразливими до наслідків пожежі (втрати корму, руйнування житла)? І навпаки, чи посилює гострий стрес від пожежі довгострокові негативні ефекти опромінення? Ця взаємодія є переднім краєм сучасних радіоекологічних досліджень.

Існує так званий «парадокс чорнобильського заповідника»: з одного боку, спостерігається висока чисельність та видове різноманіття тварин, особливо великих ссавців, що пояснюється відсутністю людського переслідування. З іншого боку, ці процвітаючі на популяційному рівні угруповання існують в умовах постійного екологічного стресу. Успіх на рівні популяцій може маскувати проблеми на рівні окремих особин – фізіологічні порушення, генетичні аномалії, скорочення тривалості життя. Довгострокові еволюційні наслідки існування в такому середовищі – під подвійним тиском радіації та вогню – залишаються невідомими і є головною загадкою екології Чорнобиля.

Висновок до розділу 2

Аналіз екологічних наслідків лісових пожеж у Чорнобильській зоні відчуження в XXI столітті дозволяє зробити низку висновків, що змінюють усталені уявлення про динаміку цієї унікальної території.

По-перше, лісові пожежі перестали бути поодинокими інцидентами і перетворилися на системний, важливий екологічний фактор, що визначає розвиток екосистем ЧЗВ. Їхня частота, а головне – масштаб, різко зросли, що кульмінувало у катастрофічних пожежах 2020 року, які охопили до третини української частини зони. Це свідчить про перехід ЧЗВ у новий, вогняний режим функціонування, зумовлений накопиченням пального матеріалу, стихійним залісненням та кліматичними змінами.

По-друге, дослідження призвели до кардинальної зміни парадигми в оцінці радіологічних ризиків. Було доведено, що головна загроза вторинного радіоактивного забруднення полягає не в атмосферному перенесенні радіонуклідів, яке створює незначні дозові навантаження для населення, а в гідрологічному шляху. Головним механізмом є пірогенна трансформація радіонуклідів, що переводить їх у водорозчинні, мобільні форми. Особливу занепокоєність викликає підвищена мобільність Стронцію-90, який, на відміну від Цезію-137, слабо сорбується ґрунтами і може масово надходити у водні системи, створюючи довгострокову загрозу для харчових ланцюгів.

По-третє, пожежі є не лише руйнівною, але й потужною формотворчою силою. Вони виступають головним каталізатором довгострокової трансформації ландшафту, прискорюючи демонтаж штучних, нестабільних соснових монокультур та сприяючи формуванню більш природних, біологічно різноманітних мішаних та листяних лісів. Водночас, вони створюють сприятливі умови для поширення інвазивних видів, що є значним екологічним викликом.

Нарешті, аналіз висвітлив головну прогалину в наукових знаннях та головний напрямок для майбутніх досліджень. Це – синергетичний вплив двох унікальних для ЧЗВ стресорів: масштабних пожеж та хронічного іонізуючого випромінювання. Розуміння того, як ця комбінація впливає на фізіологію, генетику, поведінку та довгострокову еволюційну долю популяцій диких тварин, є основою

«чорнобильського парадоксу» – феномену процвітання дикої природи в умовах екстремального та постійного екологічного стресу.

РОЗДІЛ 3. ОЦІНКА ТА ШЛЯХИ ПОЛІПШЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ

3.1. Методика інтегральної оцінки екологічного стану території після лісових пожеж

Оцінка екологічних наслідків лісових пожеж на радіоактивно забруднених територіях вимагає комплексного підходу, що виходить за межі простого вимірювання площі вигорання. Інтегральна методологія повинна охоплювати повний спектр радіоекологічних наслідків, від первинного викиду радіонуклідів в атмосферу до їх подальшої міграції в екосистемах. Така методологія складається з чотирьох взаємопов'язаних компонентів.

1. Просторово-часовий аналіз та картографування.

Основою для будь-якої подальшої оцінки є точне визначення просторових та часових параметрів пожежі. Сучасні технології дистанційного зондування Землі, зокрема використання супутникових даних, таких як MODIS, дозволяють здійснювати моніторинг поширення, інтенсивності та загальної площі пожеж практично в реальному часі. Отримані дані про вигорілі території є фундаментальним просторовим шаром для подальшого аналізу [45].

Основним етапом є накладання карт пожеж на існуючі детальні карти радіоактивного забруднення територій, що включають щільність забруднення основними довгоживучими радіонуклідами: цезієм-137 (^{137}Cs), стронцієм-90 (^{90}Sr) та ізотопами плутонію (Pu). Таке поєднання даних дозволяє негайно ідентифікувати зони, де висока інтенсивність горіння перетинається з високою

щільністю радіоактивного забруднення. Цей початковий крок є вирішальним для визначення пріоритетних ділянок для проведення польових досліджень, відбору проб та негайної оцінки ризиків [15].

2. Оцінка атмосферного викиду та переносу.

Лісові пожежі вивільняють радіонукліди, що накопичилися в біомасі та верхніх шарах ґрунту, в атмосферу. Для кількісної оцінки цих викидів використовуються два основні підходи. «Bottom-up» (висхідний) підхід базується на даних про запаси горючих матеріалів (лісова підстилка, суха трава, деревина), рівні їх забруднення та коефіцієнтах ресуспензії (частки радіонуклідів, що переходять в аерозольну форму під час горіння). «Top-down» (низхідний) підхід, або інверсне моделювання, використовує дані вимірювань концентрації радіонуклідів у повітрі на стаціонарних постах для оберненого розрахунку потужності джерела викиду [46].

Після оцінки обсягу викидів застосовуються передові моделі атмосферного переносу, такі як FLEXPART, для симуляції поширення радіоактивної хмари. Ці моделі дозволяють прогнозувати траєкторії руху аерозолів, зони їх осадження та розраховувати потенційні інгаляційні дози для населення на прилеглих територіях (наприклад, у Києві), а також для персоналу, що безпосередньо залучений до гасіння пожеж. Цей компонент методики кількісно визначає безпосередній короткостроковий та довгостроковий атмосферний ризик, пов'язаний з пожежею [47].

3. Польові дослідження та лабораторний аналіз.

Моделювання має бути верифіковане шляхом прямих вимірювань. Це вимагає розробки та впровадження стандартизованих протоколів систематичного відбору проб на вигорілих територіях. Основними об'єктами для аналізу є:

- зола та обвуглені рештки. Аналіз цих матеріалів дозволяє визначити концентрацію радіонуклідів після горіння. Процес згоряння біомаси призводить до значної концентрації радіонуклідів у золі. Наприклад, лабораторні дослідження показують, що концентрація ^{90}Sr у попелі може бути приблизно в 360 разів вищою, ніж у вихідній деревині;

- ґрунт. Відбір проб ґрунту по профілю необхідний для оцінки змін у вертикальному розподілі радіонуклідів після пожежі та впливу високих температур на їх фіксацію;
- поверхневі та ґрунтові води. Моніторинг водних об'єктів є критично важливим для відстеження вимивання новоутворених мобільних форм радіонуклідів із золи атмосферними опадами;
- атмосферні аерозолі. Відбір проб повітря безпосередньо в зоні пожеж та на прилеглих територіях дозволяє верифікувати результати атмосферного моделювання та уточнити оцінки інгаляційних ризиків.

Особливу увагу в рамках лабораторних досліджень слід приділяти аналізу хімічних форм (спеціації) радіонуклідів. Наукові дані свідчать, що пожежі трансформують радіонукліди у більш мобільні та біодоступні форми. Зокрема, водорозчинні фракції ^{137}Cs та ^{90}Sr у обвуглених рештках значно вищі, ніж у вихідному ґрунті. Це важлива зміна природи ризику, оскільки вона створює умови для інтенсивної міграції радіонуклідів з водою [15, 48].

4. Екологічна оцінка ризиків.

Завершальний етап методики полягає в інтеграції даних, отриманих на попередніх етапах, для моделювання шляхів опромінення та оцінки ризиків для людини та біоти.

- для здоров'я людини: оцінка дозових навантажень на персонал (пожежники, працівники ЧЗВ) через інгаляцію диму та зовнішнє опромінення, а також на населення через потенційне вдихання аерозолів та споживання забруднених продуктів;
- для екосистем: оцінка впливу на біорізноманіття та функціонування екосистем. це включає аналіз зниження біологічної активності ґрунту, що було зафіксовано в «Рудому лісі» після пожежі 2016 року, а також вплив на основні популяції тварин, зокрема комах (джмелів, коників, павуків), які є чутливими індикаторами стану довкілля. оцінка повинна враховувати комбінований стрес від пожежі та хронічного радіаційного опромінення [15, 34, 49].

Отже, стандартна парадигма моніторингу в ЧЗВ, яка історично була зосереджена на картуванні фіксованого забруднення та вимірюванні потужності дози гамма-випромінювання, є застарілою. Пожежі діють як сильний трансформаційний фактор, що не просто піднімає забруднення в повітря, а хімічно змінює його, підвищуючи розчинність та мобільність. Це означає, що ефективна методологія оцінки повинна пріоритезувати гідрогеологічний моніторинг та аналіз хімічних форм радіонуклідів. Запропонований інтегральний підхід є необхідною еволюцією для адекватного реагування на новий, домінуючий післяпожежний шлях ризику – довгострокове забруднення водних ресурсів.

3.2. Результати оцінки та визначення зон найбільшого екологічного ризику

Застосування інтегральної методики до аналізу пожеж дозволяє отримати кількісну та якісну оцінку їх наслідків, а також визначити території з найвищим рівнем екологічної небезпеки.

Пожежі, що сталися у квітні 2020 року, були найбільшими за всю історію існування ЧЗВ з моменту аварії. Вони охопили значні території та мали суттєві екологічні та радіоекологічні наслідки.

1. Площа та уражені екосистеми. За різними оцінками, загальна площа, пройдена вогнем, склала від 554 км² до 620 км². Вогонь поширився на критично важливі екосистеми, включаючи великі масиви соснових лісів, які є одночасно легкозаймистими та ефективними акумуляторами радіонуклідів. Окрім природних ландшафтів, було знищено значну кількість об'єктів, що мали культурну та туристичну цінність, зокрема, за оцінками, до 40% потенційних туристичних локацій.

2. Атмосферні викиди радіонуклідів. На основі різних моделей були зроблені оцінки загальної кількості радіонуклідів, що надійшли в атмосферу. Ці дані, хоч і варіюються залежно від методології розрахунку, дають уявлення про масштаб вторинного викиду.

3. Вплив на якість повітря та дозові навантаження. Моделювання атмосферного переносу та подальші вимірювання показали, що дози опромінення для населення Києва та інших європейських країн були радіологічно незначними і не становили загрози для здоров'я. Тим не менш, за даними спостережень, об'ємна активність ^{137}Cs у приземному шарі атмосфери в Києві в період пожеж досягла найвищих значень за весь час спостережень з 3 квітня 2020 року, хоча й залишалася в сотні-тисячі разів нижчою за нормативні рівні. Цей факт підкреслює значний психологічний вплив на суспільство та важливість прозорої комунікації, навіть за низьких рівнів прямого ризику. Основний радіологічний ризик стосувався пожежників та персоналу, що працював безпосередньо в зоні горіння, для яких розраховані дози були найвищими.

Аналіз просторового розподілу пожеж та їх наслідків дозволяє виділити три основні зони, що становлять найбільший поточний та майбутній екологічний ризик.

1. «Рудий ліс» та Західний радіоактивний слід. Це історично найбільш забруднені території ЧЗВ. Пожежі 2020 року пройшли значними ділянками цих зон, включаючи території зі щільністю забруднення ^{137}Cs , що перевищує 1830 kBк/м^2 . Поєднання екстремального рівня забруднення з інтенсивним горінням створює максимальний потенціал для вторинної мобілізації радіонуклідів. Проєкт RED FIRE, що досліджував наслідки пожежі 2016 року в «Рудому лісі», зафіксував значне зниження біологічної активності ґрунту на вигорілих ділянках, що свідчить про глибокі порушення функціонування екосистеми.

2. Заплави річок та водоохоронні зони. Ці території визначаються як зони високого ризику через домінування гідрологічного шляху переносу забруднення. Попіл, що осідає на заплавах або поблизу водотоків, стає прямим джерелом забруднення поверхневих та ґрунтових вод. Особливе занепокоєння викликає підвищена мобільність ^{90}Sr у золі. Дані моніторингу після пожеж показали зростання концентрації ^{90}Sr у ґрунтових водах в деяких спостережних свердловинах від 2 до 60 разів. Це перетворює вигорілі заплавні території з місць

наземного зберігання радіонуклідів на довгострокові джерела забруднення водних екосистем, що є головною довгостроковою загрозою.

3. Соснові монокультури та закинуті сільгоспугіддя. Ці території становлять найвищий ризик майбутніх пожеж. Після припинення сільськогосподарської діяльності значні площі колишніх полів зазнали природного заліснення, переважно легкозаймистою сосною звичайною (*Pinus sylvestris*). Ці молоді, густі та некеровані ліси створюють величезні та суцільні масиви горючих матеріалів, що робить їх надзвичайно вразливими до виникнення та швидкого поширення катастрофічних пожеж.

Отже, аналіз наслідків пожеж виявляє приховану, але більш небезпечну довгострокову загрозу. Початкова увага під час пожеж була прикута до атмосферного шлейфу та ризиків для Києва – видимої, але відносно короткочасної проблеми. Однак науковий аналіз, проведений після пожеж, вказує на набагато більш стійку небезпеку: трансформація радіонуклідів у водорозчинні форми створює «гідрологічну бомбу уповільненої дії». Повний ефект цього процесу може проявитися через місяці або роки, коли вимиті з попелу радіонукліди повільно мігруватимуть через системи ґрунтових вод до річки Прип'ять. Це вимагає перегляду пріоритетів у пост-пожежному реагуванні, з акцентом на моніторинг та ремедіацію вигорілих ділянок, прилеглих до водних об'єктів.

3.3. Шляхи відновлення екосистем: лісовідновлення, рекультивация ґрунтів, моніторинг біорізноманіття

Відновлення екосистем ЧЗВ після масштабних пожеж є складним завданням, що вимагає застосування науково обґрунтованих стратегій, адаптованих до унікальних умов радіоактивного забруднення. Ці стратегії повинні бути спрямовані не лише на відновлення рослинного покриву, але й на зниження екологічних ризиків та підвищення стійкості ландшафтів до майбутніх загроз.

1. Лісовідновлення.

Дослідження показують, що більшість вигорілих територій (>80%) мають високий потенціал для природної регенерації. Однак цей процес має суттєві недоліки. На початкових етапах сукцесії домінують рудеральні (сміттєві) види рослин, серед яких можуть бути й інвазивні види. Більш того, природне заліснення закинутих сільськогосподарських угідь, що відбувалося протягом десятиліть, призвело до формування монокультурних, високопожежонебезпечних соснових насаджень. Покладання виключно на природні процеси може призвести до відтворення ландшафту, вразливого до повторних пожеж.

Альтернативою є стратегія проактивного, керованого лісовідновлення. Цей підхід передбачає поступову заміну легкозаймистих хвойних монокультур на більш стійкі до вогню листяні породи. Береза повисла (*Betula pendula*), яка є піонерним видом у ЧЗВ, може відігравати головну роль у цій стратегії. Створення мішаних, мозаїчних лісових ландшафтів з переважанням листяних порід виконує подвійну функцію: відновлює лісовий покрив та формує середовище, що є менш сприятливим для поширення вогню. Такий підхід відповідає потребі у послідовній лісгосподарській стратегії, спрямованій на забезпечення довгострокової стійкості екосистемних функцій.

2. Рекультивация ґрунтів.

Для рекультивации ґрунтів, забруднених радіонуклідами, особливо на ділянках, де пожежі підвищили їх мобільність, можуть застосовуватися дві принципово різні, але потенційно взаємодоповнюючі стратегії.

Стратегія 1 – Іммобілізація [50, 51]

Метою цієї стратегії є зниження біодоступності та мобільності радіонуклідів шляхом їх міцного зв'язування у ґрунтовому комплексі. Це досягається внесенням у ґрунт спеціальних речовин-амеліорантів. Вони замикають радіонукліди в ґрунті через процеси адсорбції, іонного обміну, осадження та комплексоутворення.

Типи амеліорантів:

- Біовугілля (Biochar). Має високу пористість, велику площу поверхні та лужну реакцію, що сприяє сорбції катіонів радіонуклідів та підвищенню рН ґрунту, що знижує їх розчинність;

- Компост та органічні добрива. Органічна речовина утворює стабільні комплекси з радіонуклідами, обмежуючи їх рухливість;
- Фосфатні сполуки (наприклад, гідроксиапатит). Є надзвичайно ефективними для іммобілізації важких металів та стронцію шляхом утворення стабільних, нерозчинних фосфатних мінералів;
- Глинисті мінерали. Здатні міцно фіксувати ^{137}Cs у своїй кристалічній структурі, що робить його недоступним для рослин.

Цей метод є *in situ* технологією, придатною для обробки великих площ, де фізичне видалення забруднювача неможливе. Це стратегія довгострокового утримання забруднення на місці.

Стратегія 2 – Фітоекстракція [52-54]

Ця стратегія передбачає активне видалення радіонуклідів з ґрунту за допомогою рослин-гіперакумуляторів. Певні види рослин здатні поглинати радіонукліди з ґрунту через кореневу систему та накопичувати їх у своїй надземній біомасі (стеблах, листі). Після вегетаційного періоду забруднену біомасу збирають, висушують та утилізують як радіоактивні відходи.

Дослідження виявили види, перспективні для фітоекстракції, зокрема, сорти амаранту для накопичення ^{137}Cs та такі культури, як огірок та соняшник, для накопичення стронцію.

Біодоступність радіонуклідів для рослин можна штучно підвищити. Наприклад, внесення в ґрунт солей амонію сприяє вивільненню ^{137}Cs з ґрунтових частинок, роблячи його більш доступним для поглинання кореневою системою.

Метод є повільним і може вимагати багатьох років для досягнення помітного ефекту. Він також створює вторинний потік радіоактивних відходів (забруднена біомаса), що потребує спеціального поводження. Фітоекстракція є найбільш доцільною для очищення невеликих, локальних «гарячих точок».

Успішність відновлення екосистеми не може вимірюватися лише площею відновленого рослинного покриву. Необхідний довгостроковий моніторинг біорізноманіття як інтегрального показника здоров'я екосистеми. Наукові дослідження показали, що хронічне радіаційне опромінення негативно впливає на

популяції комах (джмелів, коників, павуків) та інших представників дикої природи. Пожежа діє як додатковий гострий стресовий фактор. Тому комплексна програма моніторингу повинна відстежувати відновлення популяцій ключових видів-індикаторів та біологічну активність ґрунтових організмів (як це робилося в рамках проекту RED FIRE), щоб забезпечити цілісну оцінку стану екосистеми.

3.4. Рекомендації для системи екологічного моніторингу і запобігання подальшим негативним наслідкам

На основі аналізу наслідків пожеж та виявлених системних проблем, а також з урахуванням міжнародних стандартів та найкращих практик, розроблено комплексні рекомендації, спрямовані на модернізацію системи екологічного управління в ЧЗВ.

Існує глибокий розрив між складними, динамічними радіоекологічними ризиками, виявленими сучасною наукою, та застарілим, фрагментованим і недостатньо оснащеним станом офіційної системи екологічного моніторингу. Це не просто технічна, а системна проблема: існуюча інфраструктура моніторингу не відповідає своєму призначенню. Вона розроблена для вимірювання статичного минулого, а не для прогнозування та управління динамічним майбутнім. Тому рекомендації спрямовані на повну перебудову системи.

1. Технологічне переоснащення. Необхідно терміново вирішити проблему критично застарілого обладнання, на яку вказують офіційні аналітичні документи українських відомств. Рекомендується інвестувати в сучасні автоматизовані пости моніторингу, лабораторне обладнання для аналізу хімічних форм радіонуклідів, а також у геоінформаційні системи (ГІС) для інтеграції, аналізу та візуалізації даних.

2. Пріоритезація гідрологічного моніторингу. Враховуючи, що забруднення води є головним довгостроковим ризиком після пожеж, рекомендується суттєво розширити мережу моніторингу ґрунтових та поверхневих вод. Особливу увагу слід приділити територіям, що зазнали впливу пожеж, та гідрологічним об'єктам нижче за течією від ЧЗВ.

3. Створення інтегрованої бази даних. Для подолання поточної фрагментації даних між різними відомствами пропонується розробити єдину національну базу екологічних даних для ЧЗВ з відкритим доступом. Це дозволить проводити комплексний аналіз, підвищить прозорість та відповідатиме міжнародним стандартам обміну інформацією.

4. Проактивне управління паливними навантаженнями. Замість пасивного реагування на пожежі, необхідно перейти до проактивного управління лісами. Це включає проведення лісгосподарських заходів (санітарні рубки, проріджування) у величезних некерованих лісових масивах, створення протипожежних розривів та сприяння поширенню менш горючих листяних порід дерев.

5. Спеціалізоване оснащення та підготовка. Пожежники, що працюють у ЧЗВ, повинні бути забезпечені спеціалізованими засобами індивідуального захисту (ЗІЗ), зокрема респіраторами для захисту від радіоактивних аерозолів, та пройти відповідну підготовку для роботи в умовах радіоактивного забруднення згідно з міжнародними рекомендаціями. Обов'язковим є індивідуальний дозиметричний контроль.

6. Впровадження сучасних систем виявлення. Необхідно впроваджувати передові, багатоступеневі системи виявлення пожеж, які здатні диференціювати типи загорянь та надавати ранні попередження. Такі системи, що використовують штучний інтелект та машинне навчання, демонструють високу точність та ефективність.

7. Імплементация рекомендацій МАГАТЕ. Україна повинна активно впроваджувати стандарти безпеки та керівництва МАГАТЕ, що стосуються

ремедіації забруднених територій (наприклад, GSG-15) та управління пожежами в таких зонах.

8. Технічна допомога та обмін знаннями. Необхідно продовжувати та розширювати проекти технічного співробітництва з міжнародними партнерами, такими як МАГАТЕ та ЮНЕП. Це стосується розбудови потенціалу, закупівлі сучасного обладнання та проведення спільних наукових досліджень.

9. Прозора комунікація. Важливо розробити та впровадити надійну стратегію комунікації з громадськістю. Надання своєчасної, точної та науково обґрунтованої інформації під час пожеж є основою для протидії дезінформації та зниження соціальної напруги, на необхідності чого наголошують численні дослідження.

Найбільшою перешкодою на шляху до покращення екологічного стану ЧЗВ є не відсутність наукового розуміння, а брак інституційної та інфраструктурної спроможності діяти на основі цього розуміння. Тому запропоновані рекомендації є найважливішою частиною цього розділу, оскільки вони спрямовані на усунення першопричини існуючої вразливості.

Висновок до розділу 3

Аналіз екологічного стану Чорнобильської зони відчуження після масштабних лісових пожеж демонструє, що ці події повністю змінили радіоекологічний ландшафт регіону. Вони перетворили проблему успадкованого забруднення на активну, триваючу загрозу, головним чином через гідрологічний перенос мобілізованих радіонуклідів. Пожежі стали головним каталізатором, що переводить відносно стабільні форми радіонуклідів, зв'язані в ґрунті та біомасі, у водорозчинні сполуки, готові до міграції в ґрунтові води та річкову мережу.

Стале майбутнє ЧЗВ та мінімізація транскордонних ризиків залежать від реалізації подвійної стратегії. По-перше, це проактивне, науково обґрунтоване відновлення екосистем, спрямоване на створення більш стійких до пожеж ландшафтів. По-друге, це термінова та всеосяжна модернізація національної

системи екологічного управління, що включає технологічне переоснащення, зміну пріоритетів моніторингу та впровадження інтегрованих баз даних. Успіх цієї стратегії неможливий без поглиблення міжнародного партнерства та гармонізації підходів з передовими світовими практиками. Лише комплексний підхід, що поєднує відновлення природи та інституційну реформу, може забезпечити довгострокову екологічну безпеку унікальної території Чорнобильської зони відчуження.

ВИСНОВКИ

У ході виконання магістерської роботи було проведено комплексну оцінку екологічного стану Чорнобильської зони відчуження після лісових пожеж, що дозволило отримати такі висновки:

1. Аналіз наукових джерел продемонстрував кардинальну зміну парадигми у вивченні лісових пожеж. Сучасна наука розглядає їх не як локальні події, а як глобальний дестабілізуючий фактор, що прискорюється зміною клімату. На радіоактивно забруднених територіях, як-от ЧЗВ, цей глобальний виклик накладається на унікальну радіоекологічну спадщину, створюючи комплексні ризики, що потребують міждисциплінарного підходу до вивчення.

2. Природно-географічні особливості ЧЗВ, зокрема переважання дерново-підзолистих піщаних ґрунтів з низькою ємністю катіонного обміну, визначають високу міграційну здатність радіонуклідів, особливо ^{90}Sr . Процеси «повторного здичавіння» та накопичення біомаси на цій геохімічно вразливій основі сформували унікальний ландшафт «стійкої крихкості», де видиме біологічне відродження маскує глибоку радіоекологічну небезпеку, що активується пожежами.

3. У ХХІ столітті лісові пожежі в ЧЗВ перетворилися із щорічних інцидентів на системний, великомасштабний екологічний фактор. Відбулося різке зростання не лише частоти, але й площі та інтенсивності пожеж, що кульмінувало у катастрофічних подіях весни 2020 року, які охопили до третини території української частини зони (від 554 до 870 км²). Це свідчить про перехід зони в новий, «вогняний» режим функціонування, зумовлений синергією накопичення пального матеріалу, стихійного заліснення та кліматичних змін.

4. Встановлено, що пожежі чинять багатогранний вплив на компоненти екосистеми. Атмосферний перенос радіонуклідів створює незначні дозові навантаження для населення за межами зони, проте несе ризики для персоналу, залученого до гасіння. Вплив на ґрунтовий покрив проявляється у вигоранні органічної речовини, пірогенній мінералізації та вивільненні радіонуклідів, а також у суттєвому зниженні біологічної активності ґрунтової біоти. Для біорізноманіття пожежі є рушієм екосистемних трансформацій: вони спричиняють загибель малорухливих видів, руйнують середовища існування, але водночас прискорюють сукцесійні процеси, сприяючи заміні штучних соснових монокультур на більш стійкі мішані ліси.

5. Доведено, що головна довгострокова загроза вторинного радіоактивного забруднення пов'язана не з атмосферним, а з гідрологічним шляхом переносу. Основним механізмом є пірогенна трансформація хімічних форм радіонуклідів, що переводить їх у водорозчинні, мобільні сполуки. Особливу занепокоєність викликає підвищена мобільність ⁹⁰Sr, який, на відміну від ¹³⁷Cs, слабо сорбується ґрунтами і може масово надходити у річкову мережу, створюючи довготривалу загрозу забруднення водних систем та харчових ланцюгів.

6. На основі інтегрального аналізу визначено три основні зони найбільшого екологічного ризику.

Перша – «Рудий ліс» та Західний радіоактивний слід, де поєднання екстремального рівня забруднення та інтенсивного горіння створює максимальний потенціал для мобілізації радіонуклідів.

Друга – заплави річок та водоохоронні зони, що є джерелом довгострокового забруднення водних екосистем через змив попелу.

Третя – соснові монокультури на закинутих сільгоспугіддях, які становлять найвищий ризик виникнення та поширення майбутніх катастрофічних пожеж.

7. Для мінімізації наслідків та запобігання майбутнім загрозам запропоновано подвійну стратегію. Вона включає проактивне відновлення екосистем (кероване лісовідновлення з переважанням листяних порід, рекультивация ґрунтів методами іммобілізації та фітоекстракції) та термінову модернізацію національної системи екологічного управління. Головні рекомендації передбачають технологічне переоснащення системи моніторингу, пріоритезацію гідрологічних спостережень, створення інтегрованої бази даних, перехід до активного управління паливними навантаженнями та поглиблення міжнародного співробітництва.

Отже, дослідження підтвердило, що лісові пожежі трансформували успадковану проблему радіоактивного забруднення ЧЗВ на активну, динамічну загрозу, головним вектором якої є гідрологічний перенос. Адекватне реагування на цей виклик вимагає переходу від застарілої системи моніторингу до комплексної, проактивної та науково обґрунтованої стратегії управління екологічними ризиками.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Novel wildfire regimes under climate change and human activity: patterns, driving mechanisms and ecological impacts / Z. Shen et al. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2025. Vol. 380, no. 1924. URL: <https://doi.org/10.1098/rstb.2023.0446> (date of access: 10.09.2025).
2. Звіт про науково-дослідну роботу. Дослідження існуючої системи реагування на небезпечні події на основі даних статистики пожеж. URL: <https://dsns.gov.ua/upload/1/8/5/4/8/6/6/zvit-pro-ndr-statistika-reaguvannia-compressed-1.pdf> (дата звернення: 10.09.2025).
3. Wildfire climate connection. URL: <https://www.noaa.gov/noaa-wildfire/wildfire-climate-connection> (date of access: 10.09.2025).
4. Climate Change Indicators: Wildfires. URL: <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-wildfires> (date of access: 10.09.2025).

5. Novel wildfire regimes under climate change and human activity: patterns, driving mechanisms and ecological impacts / Z. Shen et al. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2025. Vol. 380, no. 1924. URL: <https://doi.org/10.1098/rstb.2023.0446> (date of access: 10.09.2025).
6. Wildfires in the United States 101: Context and Consequences. *Resources for the Future*. URL: <https://www.rff.org/publications/explainers/wildfires-in-the-united-states-101-context-and-consequences/> (date of access: 10.09.2025).
7. Research Shows Increased Wildfire Risk & Long-Term Ecological Change. *Western Colorado University*. URL: <https://western.edu/newsroom/research-wildfire-risk-long-term-ecological-change/> (date of access: 10.09.2025).
8. Барановська Н. Чорнобильська зона відчуження – явище сучасності. *The world's largest collection of open access research papers*. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/38379747.pdf> (дата звернення: 10.09.2025).
9. Spatial structure of natural landscapes within the Chernobyl Exclusion Zone / T. P. Fedoniuk et al. *Journal of Water and Land Development*. 2024. P. 79–90. URL: <https://doi.org/10.24425/jwld.2024.149110> (date of access: 10.09.2025).
10. Soil Contamination by Heavy Metals and Radionuclides and Related Bioremediation Techniques: A Review / Y. Chernysh et al. *Soil Systems*. 2024. Vol. 8, no. 2. P. 36. URL: <https://doi.org/10.3390/soilsystems8020036> (date of access: 10.09.2025).
11. Shestopalov V. M., Kashparov V. A. Radionuclide migration into the geological environment and biota after the Chernobyl accident. URL: https://www.researchgate.net/publication/299035096_Radionuclide_migration_in_to_the_geological_environment_and_biota_after_the_Chernobyl_accident (date of access: 10.09.2025).
12. Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years of Experience. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1239_web.pdf (date of access: 10.09.2025).
13. Gemitzi A. Are Vegetation Dynamics Impacted from a Nuclear Disaster? The Case of Chernobyl Using Remotely Sensed NDVI and Land Cover Data. *Land*. 2020.

Vol. 9, no. 11. P. 433. URL: <https://doi.org/10.3390/land9110433> (date of access: 10.09.2025).

14. Chernobyl, 25 Years Later: Biological Legacy of a Nuclear Meltdown. *Texas Tech University Departments | TTU*. URL: <https://www.depts.ttu.edu/nsrl/get-involved/downloads/chernobyl-exhibit.pdf> (date of access: 10.09.2025).

15. Effects of Large-Scale Wildfires on the Redistribution of Radionuclides in the Chernobyl River System / Y. Igarashi et al. *Environmental Science & Technology*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c07019> (date of access: 10.09.2025).

16. Wildfires Raise Concern About Remobilized Radioactive Contamination - *Eos. Eos*. URL: <https://eos.org/articles/wildfires-raise-concern-about-remobilized-radioactive-contamination> (date of access: 10.09.2025).

17. Kuzyk A. D., Lagno D. V. Special characteristics of firefighting in radionuclide-contaminated forests of the chernobyl exclusion zone. *Fire safety*. 2019. No. 34. P. 47–53. URL: <https://doi.org/10.32447/20786662.34.2019.08> (date of access: 10.09.2025).

18. Resuspension and atmospheric transport of radionuclides due to wildfires near the Chernobyl Nuclear Power Plant in 2015: An impact assessment / N. Evangeliou et al. *Scientific Reports*. 2016. Vol. 6, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/srep26062> (date of access: 10.09.2025).

19. Preventive radioecological assessment of territory for optimization of monitoring and countermeasures after radiation accidents / B. S. Prister et al. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2018. Vol. 184-185. P. 140–151. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.01.021> (date of access: 10.09.2025).

20. Comprehensive radioecological monitoring for objects of radioactively contaminated areas / B. Prister et al. URL: https://www.researchgate.net/publication/366477050_Comprehensive_radioecological_monitoring_for_objects_of_radioactively_contaminated_areas (date of access: 10.09.2025).

21. Resuspension and redistribution of radionuclides during grassland and forest fires in the Chernobyl exclusion zone: part I. Fire experiments / V. I. Yoschenko et al. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2006. Vol. 86, no. 2. P. 143–163. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2005.08.003> (date of access: 10.09.2025).
22. Моніторинг радіоактивних речовин у водоймах та ґрунтах. *Uatom.org*. URL: <https://www.uatom.org/2021/09/28/monitoring-radioaktivnih-rechovin-u-vodojmah-ta-gruntah.html> (дата звернення: 10.09.2025).
23. Analysis of environmental radiological data relating to the 2000 wildfire at hanford. *Washington State Department of Health*. URL: https://doh.wa.gov/sites/default/files/legacy/Documents/Pubs//320-025_firerpt_e.pdf (date of access: 10.09.2025).
24. Assessment of the Consequences of Forest Fires in 2020 on the Territory of the Chornobyl Radiation and Ecological Biosphere Reserve / T. Fedoniuk et al. *Scientific Horizons*. 2021. Vol. 24, no. 8. P. 26–36. URL: [https://doi.org/10.48077/scihor.24\(8\).2021.26-36](https://doi.org/10.48077/scihor.24(8).2021.26-36) (date of access: 10.09.2025).
25. Geodesy, cartography and aerial photography / A. Babushka et al. *Geodesy, cartography and aerial photography*. 2021. Vol. 94, 2021, no. 94. P. 35–43. URL: <https://doi.org/10.23939/istcgcap2021.94.035> (date of access: 10.09.2025).
26. Study of forest fires according to remote sensing data (on the example of the Chornobyl exclusion zone) | Earthdoc. *Earthdoc*. URL: <https://www.earthdoc.org/content/papers/10.3997/2214-4609.20215K3010> (date of access: 10.09.2025).
27. Wassner N., Figueiredo A., Nunes A. N. Applying Remote Sensing to Assess Post-Fire Vegetation Recovery: A Case Study of Serra do Açor (Portugal). *Fire*. 2025. Vol. 8, no. 5. P. 163. URL: <https://doi.org/10.3390/fire8050163> (date of access: 10.09.2025).
28. Investigation of the Transfer Radioactive Contamination from the Chernobyl Zone and its Impact on Radiation in the Environment / S. Vambol et al. *Ecological Engineering & Environmental Technology*. 2024. Vol. 25, no. 12. P. 70–84. URL: <https://doi.org/10.12912/27197050/193261> (date of access: 10.09.2025).

29. The wildfire problem in areas contaminated by the Chernobyl disaster. *Home | US Forest Service*. URL: https://www.fs.usda.gov/rm/pubs_journals/2019/rmrs_2019_ager_a003.pdf (date of access: 10.09.2025).
30. Investigation into ecological impact of Chernobyl wildfires | UK Centre for Ecology & Hydrology. *UK Centre for Ecology & Hydrology*. URL: <https://www.ceh.ac.uk/news-and-media/news/investigation-ecological-impact-chernobyl-wildfires> (date of access: 11.09.2025).
31. Wildfires in the Chornobyl exclusion zone—Risks and consequences / N. A. Beresford et al. *Integrated Environmental Assessment and Management*. 2021. URL: <https://doi.org/10.1002/ieam.4424> (date of access: 11.09.2025).
32. The Return of Nature to the Chernobyl Exclusion Zone: Increases in Forest Cover of 1.5 Times since the 1986 Disaster / M. Matsala et al. *Forests*. 2021. Vol. 12, no. 8. P. 1024. URL: <https://doi.org/10.3390/f12081024> (date of access: 11.09.2025).
33. Forest fires in the Chornobyl area. *Federal Office for Radiation Protection*. URL: <https://www.bfs.de/EN/topics/ion/accident-management/emergency/chornobyl/forest-fire.html> (date of access: 11.09.2025).
34. TREE Red Fire: Radioactive environment damaged by fire | UK Centre for Ecology & Hydrology. *UK Centre for Ecology & Hydrology*. URL: <https://www.ceh.ac.uk/our-science/projects/tree-red-fire-radioactive-environment-damaged-fire> (date of access: 11.09.2025).
35. Post-fire recovery of vegetation in the Chornobyl Radiation and Ecological Biosphere Reserve / A. Zymarioieva et al. *International Journal of Environmental Studies*. 2023. P. 1–21. URL: <https://doi.org/10.1080/00207233.2023.2287345> (date of access: 11.09.2025).
36. Удосконалення американсько – українських спільних технологічних рішень та досліджень пов’язаних із пом’якшенням впливу пожеж у чорнобильській зоні відчуження. URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u184/usfs_ua_chernobyl_fire_report_fin_1.pdf (дата звернення: 11.09.2025).

37. Simulation study of radionuclide atmospheric transport after wildland fires in the Chernobyl Exclusion Zone in April 2020 / M. Talerko et al. *Atmospheric Pollution Research*. 2021. Vol. 12, no. 3. P. 193–204. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.01.010> (date of access: 11.09.2025).

38. Кафедра маркетингу та міжнародної торгівлі у 2017 році: зустріли 15-річчя і будуюмо плани на майбутнє. *Національний університет біоресурсів і природокористування України*. URL: <https://nubip.edu.ua/news/kafedra-marketynhu-ta-mizhnarodnoyi-torhivli-u-2017-rotsi-zustrily-15-richchya-i-buduyemo-1> (дата звернення: 12.09.2025).

39. Wildfires may increase radioactive contamination in rivers. URL: <https://www.ehn.org/wildfires-may-increase-radioactive-contamination-in-rivers> (date of access: 12.09.2025).

40. Wildfires Raise Concern About Remobilized Radioactive Contamination. URL: <https://eos.org/articles/wildfires-raise-concern-about-remobilized-radioactive-contamination> (date of access: 12.09.2025).

41. Chernobyl: Chapter VI. Agricultural and environmental impacts. *Nuclear Energy Agency (NEA)*. URL: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_28351/chernobyl-chapter-vi-agricultural-and-environmental-impacts (date of access: 12.09.2025).

42. Глуховський М. Куди піде радіація після пожежі у Чорнобилі? Радіобіолог про останні події у зоні відчуження. *ГЛАВКОМ*. URL: <https://glavcom.ua/interviews/kudi-pide-radiaciya-pislya-pozhezhi-u-chornobili-radiobiolog-pro-ostanni-podiji-u-zoni-vidchuzhennya-673347.html> (дата звернення: 12.09.2025).

43. Water Quality Concerns Due to Forest Fires: Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH) Contamination of Groundwater From Mountain Areas / C. Mansilha et al. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*. 2014. Vol. 77, no. 14-16. P. 806–815. URL: <https://doi.org/10.1080/15287394.2014.909301> (date of access: 12.09.2025).

44. The wildlife of Chernobyl: 30 years without man. *RSB*. URL: <https://thebiologist.rsb.org.uk/biologist-features/out-of-the-ashes> (date of access: 12.09.2025).
45. Existing Risks of Forest Fires in Radiation Contaminated Areas: A Critical Review / S. Yeremenko et al. *Ecological Questions*. 2021. Vol. 32, no. 3. P. 1. URL: <https://doi.org/10.12775/eq.2021.022> (date of access: 13.09.2025).
46. Inverse modeling of ¹³⁷Cs during Chernobyl 2020 wildfires without the first guess / O. Tichý et al. *Atmospheric Pollution Research*. 2025. P. 102419. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2025.102419> (date of access: 13.09.2025).
47. Evangeliou N., Eckhardt S. Uncovering transport, deposition and impact of radionuclides released after the early spring 2020 wildfires in the Chernobyl Exclusion Zone. *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67620-3> (date of access: 13.09.2025).
48. Regarding the possible impact of forest fires on the radioactive pollution of groundwater in the chornobyl exclusion zone / M. Panasiuk et al. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-99095-5> (date of access: 12.09.2025).
49. Cannon G., Kiang J. G. A review of the impact on the ecosystem after ionizing irradiation: wildlife population. *International Journal of Radiation Biology*. 2020. P. 1–9. URL: <https://doi.org/10.1080/09553002.2020.1793021> (date of access: 12.09.2025).
50. Soil amendments for immobilization of potentially toxic elements in contaminated soils: A critical review / K. N. Palansooriya et al. URL: https://ira.lib.polyu.edu.hk/bitstream/10397/81757/1/Palansooriya_Soil_Amendments_Immobilization.pdf (date of access: 12.09.2025).
51. Fate of Cesium and Strontium in Soil-to-Plant System (Overview). *Journal of Radiation and Nuclear Applications*. 2022. Vol. 7, no. 2. P. 87–93. URL: <https://doi.org/10.18576/jrna/070210> (date of access: 12.09.2025).
52. Ability of phytoremediation for absorption of strontium and cesium from soils using Cannabis sativa / P. S. Hoseini et al.

URL: https://ijehe.mui.ac.ir/article_27289_ebd25241830eec5d4e8bfd232bd2b00.pdf (date of access: 12.09.2025).

53. Phytoremediation of radionuclides in soil, sediments and water / Y. Lijun et al. *Journal of Hazardous Materials*.

URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124771> (date of access: 12.09.2025).

54. Physiological Responses and Phytoremediation Abilities of Cucumber (*Cucumis sativus* L.) under Cesium and Strontium Contaminated Soils / S. Ali et al. *Agronomy*. 2022. Vol. 12, no. 6. P. 1311.

URL: <https://doi.org/10.3390/agronomy12061311> (date of access: 12.09.2025).