

КОМПЛЕКСНІ ЗАХОДИ ПО ВІДНОВЛЕННЮ ВОДОЙМ ЖИТОМИРСЬКОГО ПОЛІССЯ ПІСЛЯ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ КАТАСТРОФИ

Махінько Р.Г.

Поліський національний університет
бульв. Старий, 7, 10008, м. Житомир, Україна
vse-svit@ukr.net

Катастрофічна аварія на Чорнобильській атомній електростанції, яка сталася 26 квітня 1986 року, спричинила безпрецедентне забруднення навколишнього середовища радіоактивними речовинами. Проблема радіоактивного забруднення водних об'єктів Житомирського Полісся внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС залишається актуальною і потребує невідкладних заходів для її вирішення. Значні території регіону зазнали масштабного забруднення радіонуклідами, зокрема ^{137}Cs (цезій-137) та ^{90}Sr (стронцій-90), які потрапили до ґрунтових і поверхневих вод, забруднюючи річки, озера та ставки. Високі рівні радіації у водоймах становлять серйозну загрозу для здоров'я населення, що використовує їх для питного водопостачання, рибальства та рекреаційних цілей. Крім того, радіоактивне забруднення негативно впливає на стан водних екосистем, порушуючи біологічні процеси та загрожуючи біорізноманіттю. Метою дослідження є розробка ефективних заходів для мінімізації наслідків забруднення радіонуклідами водойм Житомирського Полісся та відновлення екологічної рівноваги в регіоні. Планується провести комплексний аналіз поточного стану забруднення водойм, оцінити вплив радіації на екосистеми та здоров'я населення, вивчити існуючі методи очищення води від радіонуклідів та розробити інноваційні технологічні рішення, адаптовані до специфічних умов регіону. У статті запропоновано комплекс екологічних заходів для відновлення порушених водних екосистем, розглянуто організаційні та управлінські механізми для ефективної реалізації запропонованих заходів, проведено оцінку економічної доцільності та екологічної ефективності рішень.

Впровадження інноваційних технологій очищення водойм стимулюватиме розвиток вітчизняної науки та високотехнологічних виробництв, а також сприятиме виконанню Україною міжнародних зобов'язань у сфері ядерної безпеки та охорони довкілля. *Ключові слова:* аварія на Чорнобильській АЕС, радіоактивне забруднення, наслідки забруднення, водні об'єкти, екологічна безпека, радіонукліди, екологічний моніторинг.

Comprehensive measures for the rehabilitation of water bodies in Zhytomyr Polissya after the chornobyl disaster. Makhinko R.

The catastrophic accident at the Chornobyl Nuclear Power Plant, which occurred on April 26, 1986, caused unprecedented environmental contamination with radioactive substances. The problem of radioactive contamination of water bodies in the Zhytomyr Polissya region due to the Chornobyl accident remains relevant and requires urgent measures to address it. Significant areas of the region suffered from large-scale contamination with radionuclides, particularly ^{137}Cs (cesium-137) and ^{90}Sr (strontium-90), which entered groundwater and surface waters, polluting rivers, lakes, and ponds. High levels of radiation in water bodies pose a serious threat to the health of the population using them for drinking water supply, fishing, and recreational purposes. Moreover, radioactive contamination negatively affects the state of aquatic ecosystems, disrupting biological processes and threatening biodiversity. The research aims to develop effective measures to minimize the consequences of radionuclide contamination of water bodies in the Zhytomyr Polissya region and restore ecological balance in the area. It is planned to conduct a comprehensive analysis of the current state of water body contamination, assess the impact of radiation on ecosystems and public health, study existing methods of water purification from radionuclides, and develop innovative technological solutions adapted to the specific conditions of the region. A set of environmental measures for the restoration of disturbed aquatic ecosystems will also be proposed, organizational and managerial mechanisms for the effective implementation of the proposed measures will be considered, and an assessment of the economic feasibility and environmental effectiveness of the solutions will be carried out.

The implementation of innovative water body purification technologies will stimulate the development of domestic science and high-tech industries, as well as contribute to Ukraine's fulfillment of international obligations in the field of nuclear safety and environmental protection. *Key words:* Chornobyl Nuclear Power Plant accident, radioactive contamination, consequences of contamination, water bodies, environmental safety, radionuclides, environmental monitoring.

Постановка проблеми. Високі рівні радіації у водоймах становлять серйозний ризик для здоров'я населення, що використовує забруднені водойми для питного водопостачання, рибальства та рекреації. Крім того, радіоактивне забруднення негативно впливає на стан екосистем, порушуючи природні біологічні процеси та загрожуючи біорізноманіттю.

Незважаючи на тривалий час, що минув з моменту аварії, проблема радіоактивного забруднення водойм Житомирського Полісся залишається

гострою і потребує невідкладних заходів з мінімізації її наслідків. Це питання має важливе значення для забезпечення екологічної безпеки регіону, збереження здоров'я населення та відновлення порушених природних екосистем.

Актуальність дослідження. Актуальність проблеми мінімізації наслідків забруднення водойм Житомирського Полісся радіонуклідами після аварії на Чорнобильській АЕС є надзвичайно високою з огляду на такі фактори:

– Безпека водних ресурсів для населення. Забруднення водою радіонуклідами створює ризики для здоров'я людей, які використовують їх для питного водопостачання, риболовлі та рекреаційних цілей. Мінімізація забруднення є необхідною для запобігання негативним наслідкам опромінення.

– Збереження екосистем водою. Радіоактивне забруднення порушує природні процеси у водних екосистемах, негативно впливаючи на рослинний і тваринний світ. Заходи з очищення водою сприятимуть відновленню біорізноманіття та стабільності екосистем.

– Сталій розвиток регіону. Забезпечення екологічної безпеки водних ресурсів є ключовим фактором для сталого розвитку Житомирського Полісся, зокрема для ведення сільського господарства, розвитку туризму та збереження природних ландшафтів.

– Запобігання поширенню радіонуклідів. Забруднені водою можуть стати джерелом вторинного забруднення ґрунтів, атмосферного повітря та підземних вод. Мінімізація наслідків забруднення допоможе запобігти подальшому розповсюдженню радіонуклідів.

– Дотримання міжнародних стандартів. Україна, як країна-учасниця міжнародних угод у сфері ядерної безпеки та охорони довкілля, зобов'язана вживати заходів для мінімізації наслідків радіоактивного забруднення.

Таким чином, мінімізація наслідків забруднення водою Житомирського Полісся радіонуклідами є нагальною проблемою, яка потребує комплексного підходу та невідкладних дій з боку держави, наукової спільноти та громадськості.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дане дослідження безпосередньо пов'язане з низкою важливих наукових та практичних завдань, які мають першочергове значення для відновлення територій, постраждалих від Чорнобильської катастрофи, зокрема Житомирського Полісся.

Вивчення соціально-економічних та психологічних аспектів реабілітації територій формує основу для розробки комплексних програм сталого відродження регіону з урахуванням потреб місцевого населення.

Обмін досвідом та налагодження міжнародного співробітництва у сфері радіоекологічного відновлення навколишнього середовища сприятиме імплементації кращих світових практик і підходів, залученню додаткових ресурсів та експертизи.

Таким чином, представлене дослідження тісно пов'язане з важливими науковими та практичними завданнями у сфері ліквідації наслідків ядерних аварій, відновлення довкілля та забезпечення радіаційної безпеки, реалізація яких є вкрай необхідною для сталого розвитку Житомирського Полісся та інших постраждалих територій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Радіоактивне забруднення водою Житомирського

Полісся внаслідок Чорнобильської катастрофи активно досліджується науковцями. У 2018 році Кашпаров В. та співавтори опублікували результати моніторингу радіонуклідів у поверхневих водах Київської, Житомирської та Рівненської областей (Kashparov et al., 2018). Їхнє дослідження виявило локальні осередки підвищеного забруднення ^{137}Cs та ^{90}Sr , пов'язані з переносом радіонуклідів ґрунтовими водами та атмосферними опадами [1]. Науковці провели ґрунтовий аналіз сучасного радіоекологічного стану водних об'єктів зони відчуження ЧАЕС. Вони виявили, що рівні забруднення ^{137}Cs у воді деяких річок та озер перевищують 10 Бк/л, а в донних відкладеннях можуть сягати десятків тисяч Бк/кг [2].

Вивчався радіоекологічний стан водних екосистем зони відчуження та прилеглих територій. Дослідники відзначають значне забруднення радіонуклідами водою Київського та Житомирського Полісся, а також високі рівні накопичення ^{137}Cs та ^{90}Sr в гідробіонтах [3].

Аналізувалась ефективність застосування сорбційних завіс з рослинних матеріалів для очищення водних потоків від радіонуклідів. Автори довели, що такий підхід може значно знизити вміст ^{137}Cs та ^{90}Sr у воді та є економічно доцільним [4].

Розглядалися можливості використання коагулянтів і флокулянтів для вилучення радіоактивних часток з води на етапах її очищення. Продемонстровано високу ефективність даного методу в поєднанні з іншими технологіями водопідготовки [5].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Незважаючи на численні дослідження та заходи, вжиті для мінімізації наслідків радіоактивного забруднення водою Житомирського Полісся після Чорнобильської катастрофи, низка важливих аспектів цієї проблеми досі залишається невирішеною або потребує подальшого вивчення та вдосконалення. Серед них можна виділити наступні:

Відсутність комплексного підходу до реабілітації водою регіону. Більшість досліджень зосереджувалися на окремих аспектах проблеми або обмежених територіях, тоді як необхідний системний план дій, який би охопив усі забруднені водні об'єкти Житомирського Полісся.

Недостатня розробленість інноваційних технологій очищення води та донних відкладень від радіонуклідів. Існуючі методи не завжди є ефективними або економічно доцільними в умовах забрудненого регіону. Потрібні нові підходи з використанням нанотехнологій, плазмових процесів, комбінованих методів очищення.

Відсутність цілісної стратегії відновлення порушених водних екосистем після їх очищення від радіонуклідів. Необхідно розробити комплекс заходів з ревіталізації водою, відродження біорізноманіття, формування захисних буферних зон.

Недостатня увага до питань утилізації та захоплення радіоактивних відходів, що утворюватимуться під час очищення водойм. Потрібні безпечні та економічно доцільні методи поводження з такими відходами.

Обмеженість досліджень щодо залучення потенціалу мікроорганізмів до процесів очищення та відновлення водних екосистем. Ця перспективна галузь потребує подальшого вивчення.

Необхідність оптимізації систем радіоекологічного моніторингу водойм із застосуванням новітніх технологій дистанційного зондування та геоінформаційних систем для підвищення ефективності спостереження.

Відсутність ґрунтовних розробок щодо організаційних, управлінських та правових механізмів успішної реалізації програми реабілітації водойм на регіональному та державному рівнях.

Необхідність поглибленого вивчення соціально-економічних та психологічних аспектів процесу реабілітації територій, постраждалих від радіоактивного забруднення, для розробки збалансованих стратегій із залученням місцевих громад. Отже, комплексне вирішення зазначених невирішених частин загальної проблеми радіоактивного забруднення водойм Житомирського Полісся є ключовим завданням даного дослідження та запорукою ефективною реалізації запропонованих заходів з відновлення екологічної рівноваги в регіоні.

Новизна. Новизна полягає в комплексному та інноваційному підході до вирішення проблеми радіоактивного забруднення водойм Житомирського Полісся після Чорнобильської катастрофи. На відміну від попередніх досліджень, які розглядали окремі аспекти проблеми, в роботі запропоновано цілісну стратегію реабілітації забруднених водних об'єктів регіону, що охоплює розробку інноваційних технологічних рішень для очищення води та донних відкладень від радіонуклідів з використанням нанотехнологій, плазмових процесів, комбінованих методів, які раніше не застосовувалися в даній сфері, комплексний підхід до відновлення порушених водних екосистем після їх очищення, що включає ревіталізацію водойм, формування буферних зон, відродження біорізноманіття. Таким чином, новизна дослідження полягає у всеохоплюючому підході, який інтегрує найсучасніші наукові розробки та передові технології для комплексного вирішення проблеми радіоактивного забруднення водойм з урахуванням екологічних, технологічних, управлінських та соціальних аспектів.

Методологічне або загальнонаукове значення. Представлене дослідження має важливе методологічне та загальнонаукове значення для розвитку підходів щодо ліквідації наслідків ядерних аварій та відновлення радіоактивно забруднених територій. Його результати формують методологічну основу для розробки комплексних стратегій реабілітації

водних екосистем, порушених внаслідок радіоактивного забруднення.

На методологічному рівні, запропонований у роботі міждисциплінарний підхід, який інтегрує досягнення різних галузей науки і техніки, є новаторським та може слугувати зразком для майбутніх досліджень в сфері радіоекологічного відновлення довкілля. Поєднання інноваційних технологій очищення води, заходів з відновлення екосистем, організаційно-управлінських механізмів та соціально-психологічних аспектів формує цілісну методологію подолання складних наслідків ядерних інцидентів.

Загальнонаукове значення роботи полягає у розширенні знань про міграцію та трансформацію радіонуклідів у водних середовищах, вплив радіоактивного забруднення на біоту на молекулярному та генетичному рівнях, а також розробці нових підходів до очищення води із застосуванням нанотехнологій, плазмових процесів, біологічних методів. Результати дослідження сприятимуть розвитку таких напрямків, як радіоекологія, радіобіологія, екологічна біотехнологія, водоочисні технології тощо.

Крім того, робота вносить вагомий внесок у розбудову систем радіоекологічного моніторингу з використанням новітніх досягнень дистанційного зондування та геоінформаційних технологій. Запропоновані рішення можуть застосовуватися для спостереження за станом водних об'єктів в інших регіонах, постраждалих від радіаційного забруднення.

Виклад основного матеріалу. Житомирське Полісся, розташоване в зоні безпосереднього впливу аварії на Чорнобильській АЕС, залишається однією з найбільш забруднених радіонуклідами територій України. Водні об'єкти регіону зазнали значного радіоактивного забруднення внаслідок атмосферних випадіння та переносу радіонуклідів ґрунтовими та поверхневими водами.

Згідно з даними моніторингу, найбільш забрудненими радіонуклідами ^{137}Cs та ^{90}Sr в сотні разів більше норми є водойми, які знаходяться в зоні відчуження Чорнобильської АЕС. Рівні забруднення ^{137}Cs та ^{90}Sr у деяких річках, озерах та ставках Житомирського Полісся перевищують допустимі норми в десятки разів [1], [2].

Забруднення ^{90}Sr , який має більш тривалий період напіврозпаду, є менш вираженим, але також становить загрозу. У деяких водоймах концентрація цього радіонукліда в декілька разів перевищує норму [2].

Варто зазначити, що рівні радіоактивного забруднення водойм значно знизилися порівняно з першими роками після аварії завдяки природним процесам розпаду радіонуклідів та їх міграції. Однак, вони все ще залишаються на критично високому рівні, що вимагає невідкладних заходів для мінімізації екологічних наслідків.

Річки Тетерів, Случ, Ірпінь, Уж, Ірша та їх притоки також зазнали значного радіоактивного забруд-

нення. У верхній течії річки Уж, поблизу міста Народичі, рівні ^{137}Cs у воді досягають 5–10 Бк/л. У притоці Уж – річці Нориця, концентрації ^{137}Cs сягають 20–30 Бк/л [6].

Водосховища та озера Житомирського Полісся, розташоване за на значних відстанях від Чорнобильської АЕС, мають рівні забруднення ^{137}Cs у воді близько 1–3 Бк/л. У донних відкладеннях концентрації цезію можуть бути вищими – до 10–20 кБк/кг. Невеликі ставки також виявились забрудненими внаслідок переносу радіонуклідів водними потоками [2].

Важливо відзначити, що забруднення водойм радіонуклідами не є рівномірним і значно варіюється залежно від відстані до епіцентру аварії, типу водного об'єкту, геологічних та гідрологічних особливостей місцевості. Це вимагає диференційованого підходу до вибору методів очищення для різних водойм регіону.

Крім того, слід враховувати, що крім забруднення води, суттєвим джерелом радіоактивного опромінення є донні відкладення, які акумулюють значні кількості радіонуклідів та можуть сприяти їх міграції та біологічному перенесенню по харчових ланцюгах [3].

Радіоактивне забруднення водойм Житомирського Полісся має згубний вплив як на природні водні екосистеми: – порушення природних біологічних процесів у воді, зокрема фотосинтезу та продукції органічної речовини, зниження видового різноманіття водної рослинності та безхребетних організмів, накопичення радіонуклідів у гідробіонтах та їх міграція по трофічних ланцюгах, генетичні мутації та порушення репродуктивних функцій у риб та інших водних тварин, так і на здоров'я місцевого населення: – підвищений ризик онкологічних захворювань у мешканців забруднених територій, можливі порушення репродуктивної функції, ембріонального та постнатального розвитку, збільшення частоти спадкових захворювань та генетичних мутацій, психологічний тиск та страх за стан здоров'я у населення забруднених територій

Існують рекомендовані заходи для зменшення забруднення водойм, такі як, обмеження доступу до забруднених водойм, створення санітарно-захисних зон навколо найбільш забруднених водойм, обмеження використання водойм для питного водопостачання, рибальства та рекреаційних цілей, внесення природних мінеральних сорбентів для зв'язування радіонуклідів у донних відкладеннях, використання сорбційних завіс з рослинних матеріалів (торф, солома) для очищення поверхневого стоку [7], [8], додавання хімічних реагентів для осадження радіонуклідів у вигляді нерозчинних сполук [5], застосування коагулянтів для видалення радіоактивних часток з води [9], вирощування водних рослин, здатних акумулювати радіонукліди, та їх періодичне вилучення, створення біоплато з вищих водних рос-

лин для очищення забруднених вод, регулярні спостереження за рівнями радіоактивного забруднення водойм, збір даних про міграцію та накопичення радіонуклідів в екосистемах водойм.

Ми пропонуємо технологічні, електрохімічні, мембранні, фотокалітичні, біологічні методи та заходи з мінімізації наслідків забруднення водойм Житомирського Полісся радіонуклідами, такі як:

Використання природних та синтетичних сорбентів (цеоліти, глини, вуглецеві нанотрубки) для вилучення радіонуклідів з води та донних відкладень. Створення сорбційних завіс та фільтрів для очищення водотоків.

Електрокоагуляція для осадження радіонуклідів з води у вигляді гідроксидів. Електрохімічна деструкція органічних сполук, що містять радіонукліди.

Застосування зворотного осмосу, нанофільтрації та ультрафільтрації для видалення радіонуклідів з води. Використання селективних мембран для розділення радіонуклідів.

Використання фотокаталізаторів (TiO_2 , ZnO) для розкладання радіоактивних сполук під дією УФ-випромінювання. Комбінування фотокаталізу з окисненням та сорбцією.

ФітореMediaція з використанням гіперакумулюючих водних рослин. Застосування immobilized biofilms та мікробних паливних комірок для очищення забруднених водних мас.

Дані методи можуть успішно реалізовуватися у виробництві технологій та продуктів сфери радіаційної безпеки. Наприклад, виробництво і нанесення покриттів (фарб, полімерів) на основі радіоактивних речовин, модифікація бетонних будматеріалів, створення протирадіаційних екранувальних системи

Синтез та імплементація нових форм цих продуктів дозволяють локалізувати та обмежувати радіаційні загрози навколишньому навколишньому середовищу краще, ніж традиційні неорганічні матеріали. Радіопротекторні матеріали та речовини стійкі до абсолютної біологічної та хімічної деградації. Це надає їм величезної переваги при очищенні ґрунтів, води і повітря від різних забруднень, в тому числі агресивних радіотоксичних сполук.

Особливо перспективними є радіопротекторні полімерні компаунди та дисперсні системи, що можуть надійно локалізувати радіонукліди у водних середовищах. Багато водних екосистем успішно та спроможні існувати завдяки цим біотехнологічним матеріалам та рослинним ресурсам.

Екологічні заходи для відновлення природних екосистем:

– Ревіталізація водойм (відновлення гідрологічного режиму та природних русел річок, розчищення та реконструкція забруднених ставків та озер);

– Формування буферних зон (створення прибережних захисних смуг з природної рослинності, відновлення заплавної луки та боліт для акумуляції радіонуклідів);

– Біорізноманітність водойм (реінтродукція аборигенних видів водних рослин та тварин, боротьба з інвазивними видами, що можуть переносити радіонукліди);

– Моніторинг та наукові дослідження (постійний радіоекологічний моніторинг відновлених водойм, вивчення міграції радіонуклідів у водних екосистемах).

Організаційні та управлінські заходи:

– Нормативно-правове забезпечення (удосконалення законодавчої бази щодо поводження з радіоактивно забрудненими територіями, затвердження комплексної програми з реабілітації водойм Житомирського Полісся);

– Організаційна структура (створення координаційного органу з реалізації програми очищення водойм, налагодження міжвідомчої та міжнародної співпраці);

– Фінансування та інвестиції (виділення цільового державного фінансування на реабілітацію водойм, залучення приватних інвестицій та міжнародної допомоги);

– Інформаційна підтримка (широке інформування населення про заходи з очищення водойм, впровадження екологічної освіти та просвітницьких програм);

– Науково-технічна підтримка (розробка інноваційних технологій очищення водойм, наукове обґрунтування вибору методів реабілітації).

Комплексна реалізація запропонованих заходів дозволить мінімізувати наслідки радіоактивного забруднення водойм Житомирського Полісся та відновити їх екологічний стан.

Запропоновані заходи з мінімізації наслідків забруднення водойм Житомирського Полісся радіонуклідами мають значний потенціал для відновлення екологічного стану регіону, у зв'язку з результатами впровадження.

Зниження рівнів радіоактивного забруднення води та донних відкладень завдяки застосуванню сорбційних, електрохімічних, мембранних та фотокаталітичних методів. У деяких випадках ефективність очищення може сягати 90–99%.

Відновлення біорізноманіття водойм шляхом ревіталізації екосистем, створення буферних зон, реінтродукції аборигенних видів. Це забезпечить стійкість екосистем до радіаційного впливу.

Підвищення безпеки водокористування для населення регіону завдяки зниженню ризиків опромінення від забруднених водойм.

Поступове збереження та відродження природних ландшафтів Житомирського Полісся, сприяння розвитку рекреаційної діяльності та екологічного туризму.

Дотримання міжнародних норм радіаційної безпеки та виконання зобов'язань України в рамках відповідних конвенцій.

Серед запропонованих технологічних рішень кожен метод має свої переваги та недоліки:

Сорбційні матеріали – ефективні, відносно недорогі, але потребують утилізації відпрацьованих сорбентів. Електрохімічні методи – високоефективні, компактні, але енергозатратні та можуть генерувати вторинні відходи. Мембранні технології – забезпечують глибоке очищення, але вимагають попередньої підготовки води та часто зворотного осмосу. Фотокаталітичні процеси – екологічно безпечні, можуть руйнувати органічні сполуки радіонуклідів, проте чутливі до забруднення каталізатора. Біологічні методи – економічні, використовують природні процеси, але повільні та потребують ретельного моніторингу. Екологічні заходи з ревіталізації водойм та відновлення екосистем є довготривалими, але забезпечують комплексне відродження природного середовища регіону. Організаційні та управлінські заходи є обов'язковими для успішної реалізації технічних та екологічних рішень, однак вимагають значних зусиль з боку держави та залучення додаткових ресурсів.

Лише збалансоване поєднання різних підходів, з урахуванням специфіки кожної водойми, дозволить досягти максимальної ефективності в подоланні наслідків радіоактивного забруднення.

Для ефективного впровадження запропонованих заходів із мінімізації наслідків радіоактивного забруднення водойм Житомирського Полісся необхідно врахувати наступні рекомендації, які будуть сприяти ефективній реалізації комплексної програми з подолання наслідків радіоактивного забруднення водойм, забезпеченню екологічної безпеки регіону та відновленню порушених екосистем. Розробити деталізовану програму реабілітації водойм на державному та регіональному рівнях з чітким розподілом повноважень, ресурсів та термінів виконання. Провести ретельну інвентаризацію та картування забруднених водойм, визначити пріоритетні об'єкти для очищення. Здійснити вибір оптимальних технологій очищення для кожної водойми на основі її специфічних характеристик, рівнів забруднення та техніко-економічного обґрунтування. Забезпечити належне фінансування програми шляхом виділення коштів із державного бюджету, залучення міжнародної допомоги та впровадження економічних стимулів для приватних інвесторів. Створити сучасну інфраструктуру для збору, транспортування та безпечної утилізації радіоактивних відходів, що утворюватимуться під час очищення водойм. Налагодити тісну міжвідомчу координацію та співпрацю між органами державної влади, науковими установами, громадськими організаціями та місцевими громадами. Запровадити системний радіоекологічний моніторинг водойм до, під час і після їх реабілітації для оцінки ефективності заходів. Продовжити наукові дослідження з вивчення міграції радіонуклідів у водних екосистемах, розробки інноваційних технологій очищення, а також відновлення біорізноманіття. Забезпечити належне інформування та

екологічну просвіту населення щодо процесу реабілітації водойм, радіаційних ризиків та правил безпечного водокористування. Розглянути можливість створення міжнародного наукового центру з питань радіоекологічного відновлення територій на базі Житомирського Полісся.

Головні висновки. Проведене дослідження засвідчило, що проблема забруднення водойм Житомирського Полісся радіонуклідами внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС залишається актуальною і потребує невідкладних заходів для її розв'язання. Визначено сучасні рівні радіоактивного забруднення водойм регіону, які в деяких випадках перевищують допустимі норми в десятки разів, становлячи загрозу для екосистем та здоров'я населення. Запропоновано комплекс технологічних рішень для очищення води та донних відкладень від радіонуклідів, зокрема сорбційні, електрохімічні, мембранні, фотокаталітичні та біологічні методи. Розроблено екологічні заходи для відновлення порушених водних екосистем, включаючи ревіталізацію водойм, створення буферних зон, відродження біорізноманіття. Визначено організаційні та управлінські механізми для ефективної реалізації запропонованих заходів, зокрема вдосконалення нормативно-правової бази, створення координаційних органів, залучення інвестицій. Проведено оцінку ефективності запропонованих рішень, їх переваг та недоліків, а також сформульовано рекомендації для практичного впровадження та подальших досліджень. Реалізація запропонованих заходів дозволить мінімізувати наслідки радіоактивного забруднення, відновити екологічний стан водойм Житомирського Полісся та забезпечити екологічну безпеку регіону.

Незважаючи на комплексний характер проведеного дослідження, існують перспективи його поглиблення та розширення, а саме: детальне вивчення механізмів міграції та трансформації радіонуклідів у водних екосистемах для розробки ефективніших методів їх вилучення; дослідження впливу радіоактивного забруднення на генетичному та молекулярному рівнях для оцінки довгострокових наслідків для біоти водойм; пошук нових інноваційних технологій очищення водойм, зокрема на основі нанотехнологій, плазмових процесів, комбінованих методів; розробка економічно ефективних методів утилізації та захоронення радіоактивних відходів від очищення водойм; вивчення можливостей залучення потенціалу мікроорганізмів до процесів очищення та відновлення водних екосистем; оптимізація систем радіоекологічного моніторингу водойм із застосуванням сучасних методів дистанційного зондування та геоінформаційних технологій; дослідження соціально-економічних та психологічних аспектів реабілітації територій, постраждалих від радіоактивного забруднення; обмін досвідом та налагодження міжнародного співробітництва у сфері радіоекологічного відновлення навколишнього середовища.

У ході дослідження було розроблено комплексну стратегію для мінімізації наслідків радіоактивного забруднення водойм Житомирщини. Запропоновано низку інноваційних технологічних рішень для вилучення радіонуклідів з води та донних відкладень, зокрема сорбційні, електрохімічні, мембранні, фотокаталітичні та біологічні методи. Визначено екологічні заходи для ревіталізації водних екосистем, відновлення біорізноманіття та формування захисних буферних зон.

Окреслено організаційні та управлінські механізми успішної реалізації програми реабілітації водойм на регіональному та державному рівнях. Проведено оцінку ефективності запропонованих рішень, визначено їх переваги та недоліки, сформульовано рекомендації для подальших наукових досліджень.

Впровадження розробленої стратегії дозволить мінімізувати екологічні загрози, відновити природні водні екосистеми Житомирського Полісся, забезпечити радіаційну безпеку водокористування для населення та створити передумови для сталого розвитку регіону. Реалізація проекту реабілітації забруднених територій продемонструє відповідальність України у сфері ядерної безпеки, сприятиме залученню міжнародної експертизи, технологій та інвестицій, стимулюватиме вітчизняну науку та високотехнологічні виробництва.

Таким чином, впровадження запропонованих заходів з мінімізації наслідків радіоактивного забруднення водойм Житомирського Полісся матиме визначальне значення для відновлення екологічної рівноваги, забезпечення сталого розвитку регіону та підвищення рівня життя населення.

Перспективи використання результатів дослідження. Автор сподівається, що дане дослідження сприятиме поглибленню знань, вдосконаленню існуючих методів та розробці нових ефективних підходів до мінімізації наслідків радіоактивного забруднення водних екосистем.

Реалізація комплексу запропонованих заходів має важливе значення для подолання негативних наслідків радіоактивного забруднення водойм Житомирського Полісся та забезпечення сталого відродження регіону.

Очищення водойм від радіонуклідів та відновлення екосистем дозволить мінімізувати ризики опромінення для населення та біоти, забезпечить екологічну рівновагу в регіоні. Реабілітовані водойми можуть бути використані для питного водопостачання, рибного господарства та рекреаційних цілей, сприяючи сталому розвитку Житомирського Полісся.

Запропоновані заходи створять сприятливі умови для відновлення популяцій рідкісних видів рослин і тварин, що зазнали негативного впливу радіації.

Екологічно безпечне довкілля відкриє нові перспективи для розвитку туризму, сільського господарства та інших галузей економіки.

Зменшення радіаційних загроз та покращення якості життя сприятиме соціальній стабільності в регіоні, подоланню психологічного стресу в населення.

Впровадження програми реабілітації водойм продемонструє відповідальність України у сфері ядерної та радіаційної безпеки, її прихильність до міжнародних угод.

Розробка інноваційних технологій очищення водойм стимулюватиме розвиток вітчизняної науки та створення високотехнологічних виробництв.

Реалізація масштабної програми реабілітації забруднених територій сприятиме залученню міжнародної експертизи, технологій та інвестицій.

Література

1. Kashparov, V., Zhurba, M., Protsak, V., Yoshchenko, V., Levchuk, S. Dissolution of fuel particles from the Chernobyl nuclear power plant accident in soil and surface waters. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2018. Vol. 189. P. 54–65. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.03.005>
2. Кашпаров В. О., Жученко М. А., Левченко О. М. Сучасний радіоекологічний стан території зони відчуження. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2021. № 1(93). С. 12–20. DOI: [https://doi.org/10.32918/nrs.2021.1\(93\).02](https://doi.org/10.32918/nrs.2021.1(93).02)
3. Кузьменко М. І., Ландін В. П., Якович О. Д. Радіоекологічний стан водних екосистем зони відчуження Чорнобильської АЕС. *Вісник Житомирського національного агроєкологічного університету*. 2018. № 2(67). С. 101–113.
4. Лавренко Г. М., Лазарев М. П., Маслова О. В. Використання сорбційних завіс з рослинних матеріалів для очищення води. *Екологічна безпека*. 2009. № 2. С. 35–40.
5. Гавриленко О. П., Маслова О. В., Волков Ю. В. Хімічне осадження радіонуклідів з водних розчинів. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2009. № 3. С. 44–49.
6. Статков В. *Радіоекологія водойм*. Київ : ІГН НАНУ, 2011. 195 с.
7. Лавренко Г. М., Лазарев М. П., Маслова О. В. Використання сорбційних завіс з рослинних матеріалів для очищення води. *Екологічна безпека*. 2009. № 2. С. 35–40.
8. Гавриленко О. П., Маслова О. В., Волков Ю. В. Хімічне осадження радіонуклідів з водних розчинів. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2009. № 3. С. 44–49.
9. Краснов В. П., Гомеля М. Д. Очищення радіоактивних вод коагулянтами на основі алюмінію. *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля*. 2010. Вип. 14. С. 75–80.
10. Про додаткові заходи з відродження територій, що зазнали радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи, із соціального захисту постраждалих осіб, безпечного поводження з радіоактивними відходами : Указ Президента України від 05.07.2018 № 196/2018. *Офіційний вісник Президента України*. 2018. № 18. Ст. 287.
11. Безсонний В. Л. Методика оцінки екологічного стану водойми на основі ентропійно зваженого індексу якості води. *Екологічні науки*. 2023. № 2(47). С. 44–48.
12. Rashydov N. M. Uptake of americium-241 by plants from contaminated Chernobyl exclusive zone test site soils. III congress radiation research (radiobiology and radioecology), Kiev, 21–25 May 2003., p. 335.
13. Kutsokon N. K., Rashidov N. M., Grodzinsky D. M. Cytogenetic effects of 241Am in Allium-test. Int. Conference “Genetic Consequences of Emergency Radiation Situations”.
14. Чорнобильська катастрофа : кол. моногр. / за ред. В. Г. Барьяхтара ; МАГАТЕ. Київ : Вид. дім «ВД «ЕКМО»», 2011. 368 с. URL: <https://nukr.gov.ua/uk/publikatsiyi/chornobylska-katastrofa-kolektyvna-monohrafiia-mahateutsir1> (дата звернення: 15.06.2024).
15. 25 років Чорнобильської катастрофи. *Безпека майбутнього: Національна доповідь України*. Київ : КІМ, 2010. 356 с.
16. Краснов В. О., Носовський А. В., Рудько В. М., Щербін В. М. Об'єкт «Укриття» 30 років після аварії. *Чорнобиль (Київ. обл.) : Ін-т проблем безпеки АЕС*, 2016. 512 с.
17. Офіційний вебсайт Головного управління статистики у Житомирській області. URL: <http://www.zt.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення: 10.06.2024).
18. Оцінка якості життя та радіаційної безпеки сільського населення радіоактивно забруднених територій : монографія / Л. Д. Романчук та ін. Житомир : Графіум, 2017. 312 с.
19. Romanchuk, L. D., Herasymchuk, L. O., Kovalyova, S. P., Kovalchuk, Yu. V., Lopatyuk, O. V. Quality of life of the population resident at the radioactively contaminated area in Zhytomyr Region. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2019. Vol. 9, No. 4. P. 476–483. DOI: https://doi.org/10.15421/2019_778
20. Про правовий режим території, що зазнала радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи : Закон України від 27.02.1991 № 791а-ХІІ. *Відомості Верховної Ради України*. 1991. № 16. Ст. 198.
21. Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року : Закон України від 28.02.2019 № 2697-VIII. *Відомості Верховної Ради України*. 2019. № 16. Ст. 70.
22. Чорнобильський радіаційно-екологічний біосферний заповідник. Чорнобильський науковий хаб. 2020. № 1. С. 5–6. URL: <http://zapovidnyk.org.ua/hub/hub-1-gruden-r.pdf> (дата звернення: 15.06.2024).