

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Факультет захисту рослин, біотехнологій та екології

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

загальної екології, радіобіології та
безпеки життєдіяльності

_____ Алла КЛЕПКО

«_____» _____ 2025 р.

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему «Радіаційна безпека урановидобувної та уранопереробної промисловості України»

Спеціальність _____ 101 «Екологія»

Гарант освітньої програми

Доктор педагогічних наук, професор,
професор кафедри загальної екології,
радіобіології та безпеки життєдіяльності

_____ Володимир БОГОЛЮБОВ

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи

доктор біологічних наук, ст. наук. сп.,
завідувач кафедри загальної екології,
радіобіології та безпеки життєдіяльності

_____ Алла КЛЕПКО

Виконала

_____ Ганна КРАВЕЦЬ

КИЇВ-2025

**Національний університет біоресурсів
і природокористування України**

**Факультет захисту рослин, біотехнологій та екології
Кафедра загальної екології, радіобіології та безпеки життєдіяльності
Освітній ступінь «Бакалавр»
Спеціальність 101 «Екологія»**

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Алла КЛЕПКО
“ _____ ” _____ 2025 р.

З А В Д А Н Н Я

**НА ВИПУСКНУ
БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Кравець Ганни Сергіївни

1. Тема роботи «Радіаційна безпека урановидобувної та уранопереробної промисловості України»
керівник роботи доктор біологічних наук, ст.наук. співр. Клепко Алла Володимирівна
2. Строк подання студентом роботи 22 травня 2025 року
3. Вихідні дані до роботи: літературні та статистичні данні, нормативні документи, аналіз інформації.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
 - 4.1. Проведення аналізу інформації щодо радіаційної безпеки та нормативно-правової бази у сфері радіаційного захисту.
 - 4.2. Опис технологічних процесів урановидобування та переробки уранової руди, виявлення потенційних джерел радіоактивного забруднення.
 - 4.3. Виявлення екологічних наслідків діяльності уранових підприємств.
 - 4.4. Пропозиції практичних заходів для мінімізації радіаційного впливу та надання рекомендації щодо вдосконалення системи екологічного моніторингу

Студент

(підпис)

Ганна КРАВЕЦЬ

Керівник роботи

(підпис)

Алла КЛЕПКО

Реферат

Робота виконана на 53 сторінках, містить 3 розділи, 5 рисунків, 2 таблиці, 54 використаних джерел.

Мета роботи – проаналізувати вплив уранодобувної та уранопереробної промисловості на довкілля та здоров'я населення, визначити джерела радіоактивного забруднення, а також обґрунтувати напрями підвищення рівня радіаційної безпеки в Україні.

У результаті проведеного аналізу встановлено, що уранова промисловість України є одним із найбільш екологічно небезпечних секторів гірничо-добувної галузі, оскільки її функціонування супроводжується утворенням значної кількості радіоактивних, хімічно токсичних і важкометалевих відходів. Найбільшу небезпеку становлять уранові шахти, хвостосховища, відвали збагаченої породи та очисні споруди, які є потенційними джерелами тривалого забруднення навколишнього середовища. Особливе занепокоєння викликає застаріла інфраструктура багатьох об'єктів, що не відповідає сучасним вимогам екологічної безпеки.

Основні урановидобувні підприємства України – це, головним чином, ДП "Східний ГЗК" (Східний гірничо-збагачувальний комбінат). Він включає в себе Інгульську шахту та Смолінську шахту. Інгульська шахта видобуває уран з Мічурінського та Центрального родовищ, а Смолінська - з Ватутінського родовища. Переробка руди відбувається на Гідрометалургійному заводі м. Жовті Води.

В Україні щороку видобувають 500-800 тонн урану, що забезпечує приблизно 30% потреб вітчизняної атомної енергетики. Україна має значні запаси урану, особливо в межах Кіровоградської області. Найбільшим підприємством з видобутку та переробки урану в Україні є ДП Східний гірничо-збагачувальний комбінат.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РАДІАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ.....	9
1.1. Фізичні основи іонізуючого випромінювання.....	9
1.2. Радіаційна небезпека в урановій промисловості.....	12
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ВПЛИВУ УРАНОДОБУВНОЇ ТА УРАНОПЕРЕРОБНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ НА ДОВКІЛЛЯ ТА ЗДОРОВ'Я НАСЕЛЕННЯ.....	16
2.1. Джерела радіоактивного забруднення (радіонукліди, важкі метали, технологічні відходи).....	16
2.2. Постійний моніторинг радіаційної безпеки: сучасні методи контролю (датчики, лабораторні дослідження).....	21
2.3. Аналіз підприємств урановидобувної та уранопереробної промисловості України: розташування, екологічний вплив, наслідки для населення.....	26
РОЗДІЛ 3. ЗАХОДИ ЗМЕНШЕННЯ РАДІАЦІЙНОГО ВПЛИВУ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ГАЛУЗІ.....	32
3.1. Сучасні технології радіаційного захисту на уранових підприємствах.....	32
3.2. Модернізація виробництва та впровадження екологічних технологій.....	35
3.3. Альтернативні джерела енергії як спосіб зменшення потреби в урановидобувній промисловості.....	41
ВИСНОВКИ.....	44
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	47

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЕС — Атомна електростанція

ВООЗ — Всесвітня організація охорони здоров'я

ГІС — Геоінформаційна система

ЄС — Європейський Союз

ІВ — Іонізуюче випромінювання

МАГАТЕ — Міжнародне агентство з атомної енергії

НРБУ-97 — Норми радіаційної безпеки України 1997 року

ПВ — Підземне вилуговування

ПХЗ — Придніпровський хімічний завод

США — Сполучені Штати Америки

ВСТУП

Актуальність. Уранодобувна та уранопереробна промисловість України є джерелом значного техногенного впливу на довкілля. Внаслідок видобутку та переробки уранових руд утворюються великі обсяги радіоактивних і токсичних відходів, які забруднюють атмосферне повітря, ґрунти, поверхневі та підземні води. Високий рівень радіаційного навантаження спостерігається в районах діяльності уранових підприємств, що становить небезпеку для екосистем і здоров'я населення. Незважаючи на існування законодавчої бази у сфері радіаційної безпеки, у багатьох регіонах спостерігається відсутність ефективного контролю за станом довкілля та дотриманням норм радіаційного захисту. Актуальність теми зумовлена потребою у науково обґрунтованому аналізі екологічного стану територій, що зазнали радіаційного впливу, а також розробці дієвих заходів для підвищення рівня екологічної безпеки уранової промисловості.

Мета. Проаналізувати вплив уранодобувної та уранопереробної промисловості на довкілля та здоров'я населення, визначити джерела радіоактивного забруднення, а також обґрунтувати напрями підвищення рівня радіаційної безпеки в Україні.

Відповідно до мети було поставлено наступні **завдання**:

1. Вивчити теоретичні засади радіаційної безпеки та проаналізувати нормативно-правову базу у сфері радіаційного захисту;
2. Описати технологічні процеси урановидобування та переробки уранової руди, встановити основні джерела радіоактивного забруднення;
3. Виявити екологічні наслідки діяльності уранових підприємств;
4. Оцінити ризики для здоров'я населення;
5. Запропонувати практичні заходи для мінімізації радіаційного впливу та надати рекомендації щодо вдосконалення системи екологічного моніторингу.

Об'єкт дослідження. Уранодобувна та уранопереробна промисловість України як джерело техногенного радіаційного впливу.

Предмет дослідження. Радіоактивне забруднення та його вплив на довкілля і здоров'я населення внаслідок діяльності уранової промисловості.

Методи дослідження. Аналіз наукових публікацій і законодавчих актів, систематизація та узагальнення даних екологічного моніторингу, порівняльний аналіз екологічних показників, картографічний метод для візуалізації зони впливу забруднення.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РАДІАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ

1.1. Фізичні основи іонізуючого випромінювання

Іонізуюче випромінювання — це потік частинок або електромагнітних хвиль, енергії яких достатньо для іонізації атомів чи молекул, тобто для вибивання електронів і утворення пар «іон – вільний електрон» у середовищі, через яке вони проходять [2].

До основних типів іонізуючого випромінювання належать:

- Альфа-випромінювання (α) — потік ядер гелію-4 (2 протони + 2 нейтрони), має високу іонізуючу здатність, але низьку проникність (затримується аркушем паперу);
- Бета-випромінювання (β) — потік електронів або позитронів, проникає глибше, ніж α -частинки, але іонізує слабше;
- Гамма-випромінювання (γ) — електромагнітне випромінювання з дуже великою енергією, має високу проникність, але іонізує менше, ніж заряджені частинки;
- Нейтронне випромінювання — потік нейтронів, характерне для ядерних реакцій, має високу проникаючу здатність;
- Рентгенівське випромінювання — також електромагнітне, схоже на γ -випромінювання, але з дещо нижчою енергією [29, с. 98].

Природні джерела іонізуючого випромінювання поділяються на космічне випромінювання (яке проникає з глибокого космосу і сонця) та земне випромінювання — радіоактивні елементи в земній корі, зокрема уран, торій, калій-40 тощо. Значну частку фонові радіації становить радон, який надходить у повітря з ґрунтів і будівельних матеріалів [22].

Штучні джерела іонізуючого випромінювання включають ядерні реактори, рентгенівське обладнання, медичне обладнання (гамма-ножі, томографи), установки для стерилізації й опромінення, відходи урановидобувної та уранопереробної промисловості [25, с. 7].

Іонізуюче випромінювання є основною причиною радіаційного впливу на людину. Його дія на біологічні тканини зумовлює молекулярні зміни, включаючи розриви ланцюгів ДНК, утворення вільних радикалів та мутацій [45, с. 222]. Основні види іонізуючого випромінювання та їх характеристика відображені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Основні джерела радіаційного випромінювання та їх характеристики

Джерело випромінювання	Тип випромінювання	Потенційна небезпека	Сфера поширення / використання
Природне (космічне, радон)	Альфа, гама	Може викликати мутації, рак	Атмосфера, ґрунт, житлові будинки
Медичне опромінення	Рентгенівське	Накопичення дози, канцерогенез	Діагностика (рентген, КТ)
Техногенне (АЕС, аварії)	Бета, гама	Гостре радіаційне ураження	Ядерна енергетика, ЧАЕС
Побутові джерела	Низьке іонізуюче	Мінімальна небезпека	Димові сповіщувачі, деякі годинники
Виробниче (промислове)	Гама, нейтронне	Мутагенна дія, рак	Рентгенографія зварних швів

Основні фізичні параметри іонізуючого випромінювання

1. Пробіг (діапазон) — максимальна відстань, яку частинка може подолати в речовині до повної зупинки. Наприклад, пробіг альфа-частинок у повітрі становить кілька сантиметрів, а у біологічних тканинах — частки міліметра [2].

2. Проникаюча здатність — визначає глибину проникнення випромінювання в речовину. Вона залежить від типу випромінювання, його енергії та властивостей середовища [25, 29].

3. Іонізаційна здатність — кількість іонних пар, що утворюються в одиниці довжини шляху частинки в речовині. Альфа-частинки мають найвищу іонізаційну здатність, за ними йдуть бета-частинки, потім — гама-кванти [2].

4. Лінійна передача енергії (LET, Linear Energy Transfer) — енергія, яку частинка втрачає на одиницю довжини пробігу. Це важливий параметр для оцінки біологічної ефективності різних типів випромінювання [22].

5. Активність (A) — кількість ядер, що розпадаються в одиницю часу. Вимірюється в бекерелях (1 Бк = 1 розпад/с) або кюрі (1 Ки = $3,7 \times 10^{10}$ розпадів/с) [45].

6. Доза опромінення — кількість енергії, яку ІВ передає одиниці маси речовини. Основні дозиметричні величини — поглинена доза (Грей), еквівалентна доза (Зіверт), ефективна доза [45].

Іонізуюче випромінювання не можна відчутти органами чуття, тому для його виявлення та кількісної оцінки використовуються спеціальні одиниці вимірювання, що описують рівень опромінення, його інтенсивність і потенційний біологічний ефект. Основні величини, які застосовуються у радіаційній фізиці та захисті людини від опромінення, включають експозиційну, поглинуту та еквівалентну дозу.

Експозиційна доза (X) характеризує здатність фотонного (гамма- та рентгенівського) випромінювання йонізувати повітря. Вона визначається як сумарний електричний заряд всіх іонів одного знаку, утворених у сухому повітрі одиничної маси.

Основна одиниця в системі СІ - кулон на кілограм (Кл/кг). Позасистемна одиниця - рентген (Р), $1 \text{ Р} \approx 2,58 \times 10^{-4} \text{ Кл/кг}$ [2].

Поглинута доза (D) — це кількість енергії, яку поглинає одиниця маси речовини внаслідок дії іонізуючого випромінювання. Вона є фізичною основою для оцінювання радіаційного впливу на об'єкти навколишнього середовища або

живі тканини. Основна одиниця - грей (Гр), $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$. Позасистемна одиниця - рад ($1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Гр}$) [29].

Еквівалентна доза (H) враховує не тільки кількість поглинутої енергії, а й тип іонізуючого випромінювання. Вона розраховується як добуток поглинутої дози на відповідний радіаційно-ваговий коефіцієнт (w_R) для кожного виду випромінювання. Основна одиниця - зіверт (Зв), $1 \text{ Зв} = 1 \text{ Гр} \times w_R$. Наприклад, для α -випромінювання $w_R = 20$, для β та γ — $w_R = 1$ [25].

Ефективна доза (E) враховує не лише тип випромінювання, а й чутливість опромінюваних тканин і органів. Вона є основною дозиметричною величиною для оцінки ризику від радіаційного впливу на здоров'я людини. [25].

Активність (A) джерела випромінювання — це кількість ядер, які зазнають радіоактивного розпаду за одиницю часу. Основна одиниця - бекерель (Бк) — $1 \text{ Бк} = 1 \text{ розпад/с}$. Історична одиниця - кюрі (Ки), $1 \text{ Ки} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Бк}$ [45].

Відповідно до міжнародних стандартів Міжнародної комісії з радіаційного захисту (ICRP) та українського законодавства, встановлені гранично допустимі дози (ГДД) опромінення для персоналу, що працює з джерелами ІВ - річна ефективна доза не повинна перевищувати 20 мЗв/рік (усереднена за 5 років), не більше 50 мЗв у жоден рік. Для населення - ефективна доза не повинна перевищувати 1 мЗв/рік [21].

Ці норми базуються на оцінці ймовірності виникнення стохастичних ефектів (насамперед онкологічних захворювань) при різних рівнях опромінення.

1.2. Радіаційна небезпека в урановій промисловості

Урановидобувна та уранопереробна промисловість є одними з найнебезпечніших видом діяльності у плані радіаційної безпеки серед усіх галузей економіки. Високий рівень небезпеки зумовлений особливостями сировини — уранової руди, яка містить природні радіонукліди, а також специфікою технологічних процесів видобутку, збагачення, переробки та зберігання відходів. На всіх етапах цього технологічного циклу — від

геологорозвідки до остаточного захоронення відпрацьованих матеріалів — відбувається вивільнення радіоактивних ізотопів у навколишнє середовище, що створює суттєву загрозу для здоров'я працівників, навколишнього середовища і населення загалом.

Основними джерелами іонізуючого випромінювання в урановій промисловості є природні радіонукліди уранового ряду, а саме уран-238, уран-235, торій-232, а також їхні продукти розпаду, серед яких особливо небезпечними є радон-222, радій-226, полоній-210, свинець-210. Ці речовини володіють високою біологічною активністю, здатні накопичуватися в організмі людини та викликати променеві ураження різного ступеня тяжкості. Продукти розпаду радіоактивних ізотопів здатні включатися в біологічні ланцюги, створюючи загрозу здоров'ю не лише безпосередньо під час видобутку, але й у довгостроковій перспективі, оскільки радіонукліди можуть проникати в організм через повітря, воду та їжу [25].

Одним із найнебезпечніших продуктів розпаду урану є радон-222 — радіоактивний інертний газ, який утворюється під час розпаду радію-226. Він має властивість вивільнятися в повітря при видобутку, дробленні і переробці уранової руди. Радон-222, а також його дочірні продукти розпаду — полоній-218, свинець-214, вісмут-214 — можуть проникати у дихальні шляхи працівників уранових шахт і кар'єрів у вигляді аерозолів, опромінюючи епітелій легенів, що значно підвищує ризик виникнення онкологічних захворювань, зокрема раку легень [29].

Працівники уранових шахт і переробних підприємств піддаються як зовнішньому, так і внутрішньому опроміненню. Зовнішнє опромінення відбувається внаслідок перебування в зонах з підвищеним гамма-фоном або контакту з радіоактивними матеріалами та обладнанням, яке накопичує радіоактивні ізотопи. Внутрішнє опромінення відбувається через інгаляцію пилу, що містить радіонукліди, або через надходження радіоактивних речовин через воду та їжу. Легені, печінка, нирки, кістковий мозок та щитоподібна залоза є найбільш вразливими органами при внутрішньому опроміненні [15].

Уранова промисловість має значний негативний вплив на навколишнє середовище, зокрема через утворення значних обсягів радіоактивних відходів, таких як хвости збагачення, шлами, шахтні води. Якщо ці відходи не ізольовані належним чином, вони можуть потрапити в ґрунтові води та річки, що призводить до радіоактивного забруднення водного середовища. Радіонукліди накопичуються в рослинах, ґрунтах і мікроорганізмах, що впливає на всю екосистему та може потрапляти в організм людини через трофічні ланцюги [3].

Однією з найбільших проблем уранової промисловості є недостатня рекультивація територій після завершення видобутку. Відкриті кар'єри та шахти, де проводився видобуток урану, часто залишаються без належного відновлення. Багато з цих територій можуть ставати джерелом постійного викиду радону в атмосферу, що продовжує забруднювати довкілля. Хвостосховища, в яких зберігаються радіоактивні відходи, без належної герметизації під дією атмосферних опадів можуть стати джерелом розтікання радіоактивних речовин. Такі об'єкти можуть залишатися небезпечними протягом десятків, а інколи і сотень років, оскільки періоди напіврозпаду основних ізотопів уранового ряду становлять тисячі і навіть мільйони років [8].

За даними МАГАТЕ та ВООЗ, серед працівників урановидобувних підприємств відзначається підвищена захворюваність на рак легенів, хронічні захворювання органів дихання, а також хвороби печінки і нирок. Продовжуючи працювати в умовах постійного впливу іонізуючого випромінювання, працівники можуть зазнати генетичних мутацій, які можуть передаватися наступним поколінням [44].

Для зниження рівня радіаційної небезпеки в урановій промисловості необхідно вжити комплексні заходи. Сюди входить регулярний радіаційний моніторинг, використання сучасних засобів індивідуального захисту для працівників, організація ефективної вентиляції у шахтах, будівництво надійних сховищ для радіоактивних відходів, рекультивація територій після завершення видобутку. Одночасно потрібно суворо дотримуватися національних та

міжнародних стандартів дозових навантажень, таких як НРБУ-97, рекомендації МАГАТЕ та ICRP.

З урахуванням усіх цих факторів, уранова промисловість потребує постійного контролю з боку держави, науково обґрунтованого планування технологічних процесів, а також безперервного підвищення кваліфікації персоналу в галузі радіаційної безпеки, що забезпечить мінімізацію ризиків для людей та навколишнього середовища.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ВПЛИВУ УРАНОДОБУВНОЇ ТА УРАНОПЕРЕРОБНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ НА ДОВКІЛЛЯ ТА ЗДОРОВ'Я НАСЕЛЕННЯ

2.1. Джерела радіоактивного забруднення (радіонукліди, важкі метали, технологічні відходи)

Уранодобувна та уранопереробна промисловість України є вагомими джерелами радіоактивного забруднення навколишнього середовища. Основними компонентами такого забруднення є радіонукліди, важкі метали та технологічні відходи, які утворюються під час видобутку та переробки уранових руд.

У процесі видобутку та переробки уранових руд у навколишнє середовище надходять природні радіонукліди, такі як уран-238, торій-232 та продукти їх розпаду, включаючи радон-222. Ці елементи можуть накопичуватися в ґрунтах, водних ресурсах та атмосфері, створюючи потенційну небезпеку для екосистем та здоров'я населення. Зокрема, на території Волинської області було зафіксовано значне накопичення радіонуклідів Cs-137 та Sr-90 у ґрунтах і водах, що свідчить про тривалий вплив радіоактивного забруднення на регіон [46].

Окрім радіонуклідів, уранодобувна та уранопереробна промисловість сприяє забрудненню навколишнього середовища важкими металами, такими як свинець, кадмій та ртуть. Ці елементи можуть потрапляти у водні ресурси та ґрунти, накопичуватися в живих організмах, що призводить до біомагніфікації та негативно впливає на здоров'я людей і тварин [33]. Дослідження вказують на перевищення гранично допустимих концентрацій важких металів у забруднених територіях, що підкреслює необхідність постійного моніторингу та впровадження заходів щодо зменшення їх впливу.

Технологічні відходи, що утворюються під час видобутку та переробки уранових руд, включають відвали шахтних порід, рідкі та газоподібні викиди, які є джерелами радіаційного забруднення. Вони можуть містити природний уран, торій-232, продукти розпаду уранового та торієвого рядів, включаючи радон. Ці

відходи можуть негативно впливати на навколишнє середовище та здоров'я населення, особливо в регіонах, де здійснюється видобуток та переробка уранових руд [26].

Особливу небезпеку становлять хвостосховища — місця зберігання відходів переробки уранових руд. На території України, зокрема в Дніпропетровській області, накопичено понад 90 млн тонн радіоактивних відходів, які зберігаються у 9 хвостосховищах м. Дніпродзержинська та 2 хвостосховищах поблизу м. Жовті Води. Багато з цих сховищ були збудовані без належних проектів та не мають спеціальної гідроізоляції, що призводить до можливого використання відходів у будівельних матеріалах та радіоактивного забруднення територій житлових забудов [4].

Радіоактивні відходи можуть суттєво впливати на гідросферу регіону. Зокрема, стічні води від переробки уранових руд можуть містити значні концентрації радіонуклідів та важких металів, які потрапляють у поверхневі та підземні води. Це призводить до забруднення водних ресурсів, що використовуються для питного водопостачання та зрошення сільськогосподарських угідь, створюючи ризики для здоров'я населення та екосистем [24].

Уранова промисловість займається видобутком і переробкою, збагаченням урану і приготуванням ядерного палива. Основною сировиною для цього палива є уран-235. Під дією теплових нейтронів він зазнає реакції поділу. В урановій руді урану-235 знаходиться всього 0,7 %. На кожному з цих етапів виробництва можливе забруднення навколишнього середовища радіонуклідами. Відходи заводів, що містять радіоактивні речовини, можуть потрапити в річки й озера, можливе витікання фториду урану на збагачувальних заводах. Радіоактивні речовини також потрапляють у навколишнє середовище у разі виникнення аварійної ситуації під час транспортування, зберігання тепловидільних елементів (твелів) тощо. У радіохімічній промисловості твели, які відслужили свій термін, надходять для регенерації ядерного палива: урану, плутонію і продукт ...поділу урану. Підприємства, що займаються регенерацією ядерного палива, є

потенційними джерелами радіоактивного забруднення навколишнього середовища. Вони періодично скидають стічні води, що містять радіоактивні речовини, які можуть накопичуватися в екосистемах, впливаючи на флору, фауну та здоров'я людей. Забруднення може відбуватися також унаслідок аварій на підприємствах з переробки або при руйнуванні сховищ радіоактивних відходів. Наприклад, у вересні 1957 року на Південному Уралі поблизу міста Киштим сталася велика аварія, під час якої одним із найбільш небезпечних викинутих радіоізотопів був біологічно активний стронцій-90. Площа забруднення цим елементом становила 23 000 км² [26].

Відпрацьовані тепловидільні елементи (твели) після використання в реакторах зберігаються на території атомних електростанцій у спеціальних басейнах з водою протягом кількох років для зниження їхньої радіоактивності. Після цього їх транспортують на заводи для регенерації ядерного палива, де з них вилучають залишковий уран для виготовлення нових твелів. Однак після другого циклу регенерації паливо насичується значною кількістю сторонніх ізотопів і продуктів розщеплення, що унеможлиблює його подальше використання в реакторах. Лише близько 2% урану, що був у твелі першого циклу, піддається вигорянню. В результаті твел стає високорадіоактивним матеріалом, який потребує довготривалого зберігання протягом сотень і тисяч років [19].

Радіація має властивість робити радіоактивними матеріали, що контактують з нею, включаючи машини, контейнери, обладнання, приміщення та навіть одяг персоналу. Ці матеріали також стають небезпечними для біосфери і потребують надійного зберігання. Оскільки радіоактивні ізотопи мають тривалий період напіврозпаду, який може обчислюватися тисячами років, необхідно забезпечити безпечне зберігання таких матеріалів протягом цього часу. Контейнери з відходами не повинні контактувати з підземними водами, а сховища потребують вентиляції, оскільки виділення тепла з відходів може призвести до нагрівання контейнерів до температури 200 °С, що може

спричинити їх розтріскування. Крім того, сховища мають бути надійно охоронюваними, щоб запобігти проникненню сторонніх осіб або зловмисників.

Сучасні методи радіохімічної переробки відпрацьованого ядерного палива спрямовані на вилучення урану, плутонію та інших трансуранових елементів для їх повторного використання або безпечного зберігання. Однак ці процеси супроводжуються утворенням радіоактивних відходів, які потребують спеціальних заходів щодо їхньої утилізації та зберігання. Невирішеність проблеми безпечного зберігання та утилізації радіоактивних відходів залишається актуальною, оскільки існує ризик їхнього потрапляння в навколишнє середовище, що може призвести до негативних наслідків для екосистем та здоров'я населення [50].

Радіаційне забруднення є одним із найнебезпечніших екологічних факторів, який чинить серйозний вплив на здоров'я людей, зокрема сприяє розвитку онкологічних захворювань, мутагенних ефектів, а також хвороб дихальної та серцево-судинної систем. Уранодобувна та уранопереробна промисловість, що діє в Україні, створює серйозні ризики для населення, оскільки в процесі видобутку, переробки та зберігання радіоактивних відходів відбувається забруднення навколишнього середовища радіонуклідами, які можуть потрапляти в організм людини через повітря, воду та харчові продукти [52].

Радіаційне опромінення є потужним канцерогенним фактором, що спричиняє злякисні новоутворення внаслідок генетичних змін у клітинах. Відомо, що найбільший ризик розвитку онкологічних захворювань пов'язаний із впливом таких радіонуклідів, як уран-238, радон-222, стронцій-90 та цезій-137. Найбільш вразливими є клітини, що швидко діляться, зокрема клітини кісткового мозку, щитоподібної залози та епітелію органів дихання.

Аварія на Чорнобильській АЕС стала одним із найбільш яскравих прикладів радіаційного впливу на здоров'я населення. За даними наукових досліджень, проведених після катастрофи, у потерпілих регіонах України, Білорусі та Росії значно зросла кількість випадків раку щитоподібної залози,

лейкемії та раку молочної залози. Особливо чутливими до радіації виявилися діти та підлітки, які на момент аварії проживали на забруднених територіях [51].

Окрім Чорнобильської катастрофи, підвищена онкологічна захворюваність спостерігається у регіонах, де ведеться уранодобувна промисловість, зокрема у місті Жовті Води Дніпропетровської області, де фіксується підвищена частота захворювань на рак легенів та рак шлунково-кишкового тракту через хронічний вплив радону [34].

Радіація є також потужним мутагенним фактором, що може викликати зміни у генетичному матеріалі клітин. Це призводить до зростання рівня спадкових захворювань та вроджених патологій у дітей, народжених від батьків, які зазнали радіаційного впливу.

Генетичні мутації, спричинені іонізуючим випромінюванням, можуть мати як соматичний (зміни у клітинах організму, що можуть призводити до онкологічних захворювань), так і генеративний характер (мутації в статевих клітинах, що передаються наступним поколінням). Дослідження, проведені в Чорнобильській зоні, виявили підвищену частоту хромосомних аномалій у місцевого населення, зокрема у дітей ліквідаторів аварії [36].

Також в регіонах, де ведеться урановидобуток, фіксується збільшення випадків вроджених аномалій у новонароджених, включаючи мікроцефалію, порушення розвитку кісткової системи, розщеплення піднебіння та серцево-судинні вади [35].

Одним із найнебезпечніших радіоактивних елементів, що впливають на дихальну систему, є радон-222. Він утворюється при розпаді урану та легко накопичується у підвальних приміщеннях будинків, шахтах та закритих просторах. Радон потрапляє в організм людини переважно через вдихання, осідає в легенях та спричиняє пошкодження альвеолярного епітелію.

Дослідження показали, що тривалий вплив радону підвищує ризик розвитку раку легенів у 1,5-2 рази, особливо серед шахтарів уранових рудників та мешканців будинків з високими концентраціями цього газу [49]. У місті Жовті Води рівень захворювань дихальної системи перевищує середній показник по

Україні у 2,5 рази через наявність у навколишньому середовищі значної кількості уранових відходів.

Радіаційне забруднення також негативно впливає на серцево-судинну систему, викликаючи зміни в судинах, артеріальну гіпертензію та ішемічну хворобу серця. Дослідження, проведені серед ліквідаторів аварії на ЧАЕС, показали, що навіть низькі дози радіації можуть спричинити порушення ендотеліальної функції судин, що підвищує ризик інфарктів та інсультів [51].

Крім того, у регіонах із високим рівнем радіаційного забруднення зафіксовано зростання смертності від серцево-судинних захворювань. Наприклад, у Дніпропетровській області рівень гіпертонії та ішемічної хвороби серця серед населення, яке проживає поблизу уранових родовищ, є на 40% вищим порівняно з іншими регіонами України [27].

Вплив радіаційного забруднення на здоров'я населення є багатофакторним та довготривалим. Іонізуюче випромінювання спричиняє значне зростання онкологічних захворювань, мутацій, ураження дихальної та серцево-судинної систем, а також негативно впливає на репродуктивне здоров'я.

2.3. Постійний моніторинг радіаційної безпеки: сучасні методи контролю (датчики, лабораторні дослідження)

Постійний моніторинг радіаційної безпеки на підприємствах урановидобувної та уранопереробної промисловості України є критично важливим для забезпечення здоров'я населення та охорони навколишнього середовища. Цей процес включає застосування сучасних методів контролю, таких як використання датчиків, лабораторних досліджень та впровадження інноваційних технологій.

Урановидобувна та уранопереробна промисловість є джерелами потенційної радіаційної небезпеки. Під час видобутку та переробки уранових руд можливе вивільнення радіоактивних речовин у навколишнє середовище, що може призвести до забруднення повітря, води та ґрунту. Це, в свою чергу,

становить загрозу для здоров'я працівників підприємств та населення, яке проживає в прилеглих районах. Тому постійний моніторинг радіаційної обстановки є необхідним для своєчасного виявлення та запобігання негативним наслідкам.

Сучасні методи контролю радіаційної безпеки включають:

1. *Використання датчиків та автоматизованих систем моніторингу.*

Сучасні технології дозволяють здійснювати безперервний контроль радіаційного фону за допомогою датчиків, інтегрованих в автоматизовані системи моніторингу. Ці системи забезпечують оперативне виявлення підвищених рівнів радіації та дозволяють швидко реагувати на потенційні загрози. Наприклад, на комплексі виробництв «Вектор» була впроваджена система дозиметричного контролю та радіаційного моніторингу, яка базується на новітньому обладнанні та забезпечує тривалий термін експлуатації [28].

2. *Лабораторні дослідження.* Лабораторні аналізи проб ґрунту, води та повітря є невід'ємною частиною радіаційного моніторингу. Вони дозволяють визначити концентрацію радіонуклідів та оцінити рівень забруднення навколишнього середовища. В Україні функціонують спеціалізовані лабораторії, такі як Лабораторія радіоекологічної безпеки та радіаційного моніторингу, яка займається вивченням поведінки радіонуклідів у природному середовищі та розробкою нормативно-правового забезпечення в галузі радіаційної безпеки [28].

3. *Інтеграція технологій Інтернету речей (IoT) та хмарних сервісів.*

Сучасні підходи до радіаційного моніторингу включають використання технологій Інтернету речей (IoT) та хмарних сервісів. Це дозволяє створювати розподілені мережі датчиків, які в режимі реального часу передають дані про радіаційну обстановку до централізованих систем обробки. Такий підхід забезпечує оперативність та точність у виявленні радіаційних загроз [52].

4. *Радіонуклідний моніторинг.* Радіонуклідний моніторинг базується на реєстрації процесів, що супроводжуються викидом радіоактивних речовин у повітря, та визначенні концентрації радіонуклідів. Цей метод дозволяє оцінити

рівень забруднення та вжити необхідних заходів для захисту населення та навколишнього середовища [20].

Відповідно до норм безпеки МАГАТЕ, виділяють три основні види моніторингу: контроль джерел випромінювання, спостереження за станом навколишнього середовища та індивідуальний дозиметричний контроль (оцінка опромінення людини). У 2018 році МАГАТЕ представило Загальне керівництво з техніки безпеки N. GSG-8 «Радіаційний захист населення та навколишнього середовища», яке містить рекомендації щодо впровадження вимог Міжнародних базових стандартів безпеки та стандартів МАГАТЕ, спрямованих на захист людей і довкілля від радіаційних загроз.

Також існує концепція, згідно з якою радіаційний моніторинг розглядається як частина екологічного контролю. Він передбачає систематичний нагляд за об'єктами, що можуть становити радіаційну небезпеку, у звичайних умовах та посилене спостереження під час надзвичайних ситуацій. У межах цього підходу виокремлюють базовий моніторинг, що не потребує розгортання додаткових спостережних станцій чи кризових телекомунікацій; кризовий моніторинг, який застосовується на територіях, забруднених через аварійні викиди радіонуклідів; а також науковий моніторинг, що проводиться дослідницькими установами з метою розробки методик і програм радіологічного аналізу [23].

У процесі радіаційного моніторингу довкілля визначають рівень питомої активності альфа-, бета- та гама-радіонуклідів, а також концентрацію цезію-137 (рис. 2.1) і стронцію-90 (рис. 2.2) у природних об'єктах. Особливу увагу приділяють вимірюванню щільності радіоактивного забруднення ґрунту та активності водних ресурсів, оскільки ці показники безпосередньо впливають на вміст радіонуклідів у продуктах харчування та, відповідно, рівень внутрішнього опромінення людини.

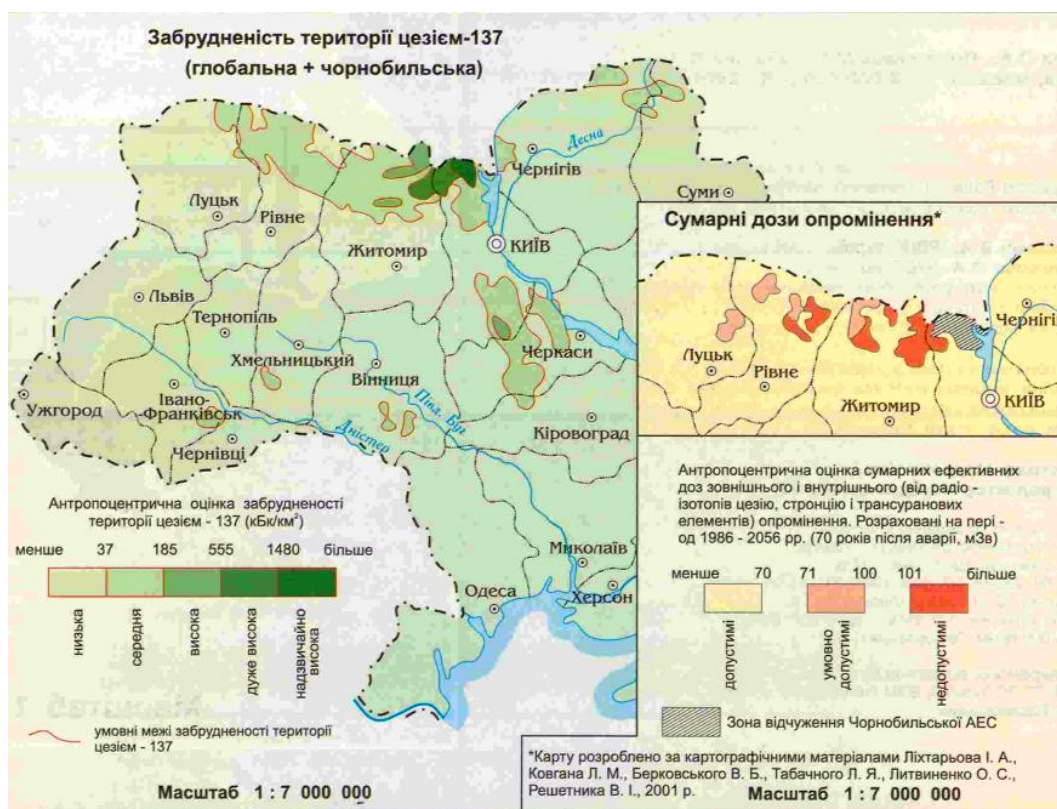


Рис. 2.1. Забруднення цезієм-137 території України

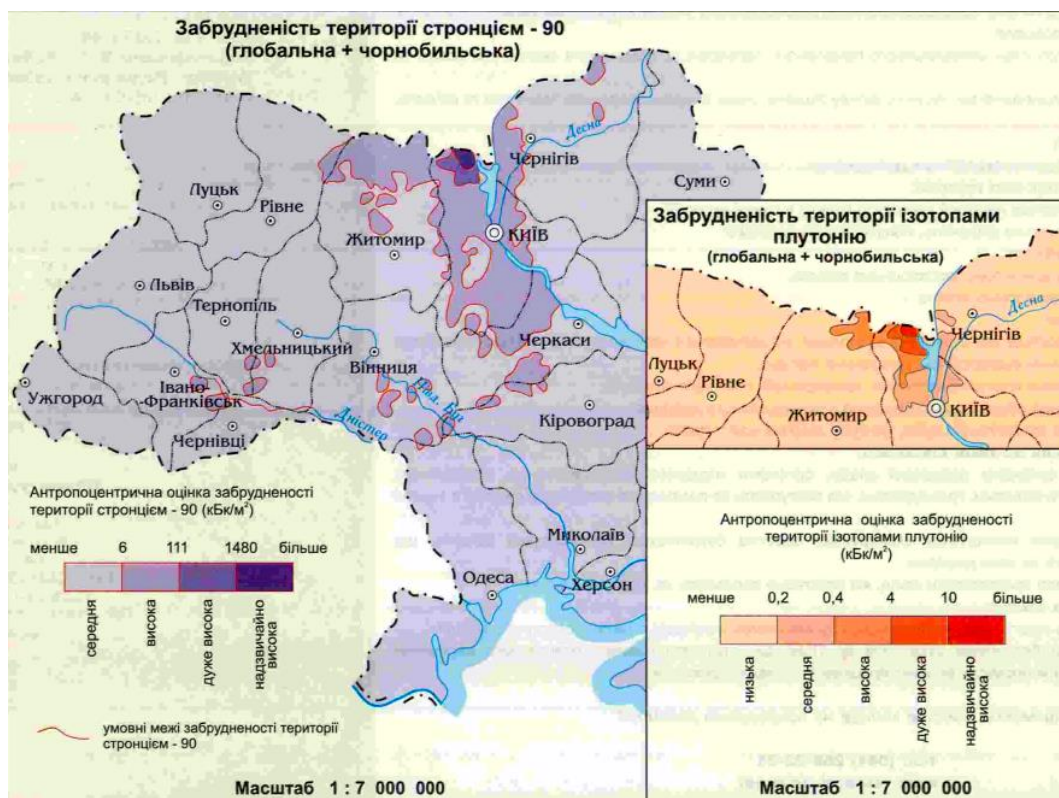


Рис. 2.2. Забруднення стронцієм-90 території України

<https://www.uatom.org/2021/09/28/monitoring-radioaktivnih-rechovin-u-vodojmah-ta-gruntah.html>

В Україні реалізуються проекти, спрямовані на вдосконалення систем радіаційного моніторингу (Рис 2.3). Наприклад, на підприємстві «Вектор» була створена система дозиметричного контролю та радіаційного моніторингу, яка забезпечує контроль радіаційної обстановки на території підприємства для зниження дозових навантажень на персонал та захисту навколишнього середовища від забруднення радіоактивними відходами [23].

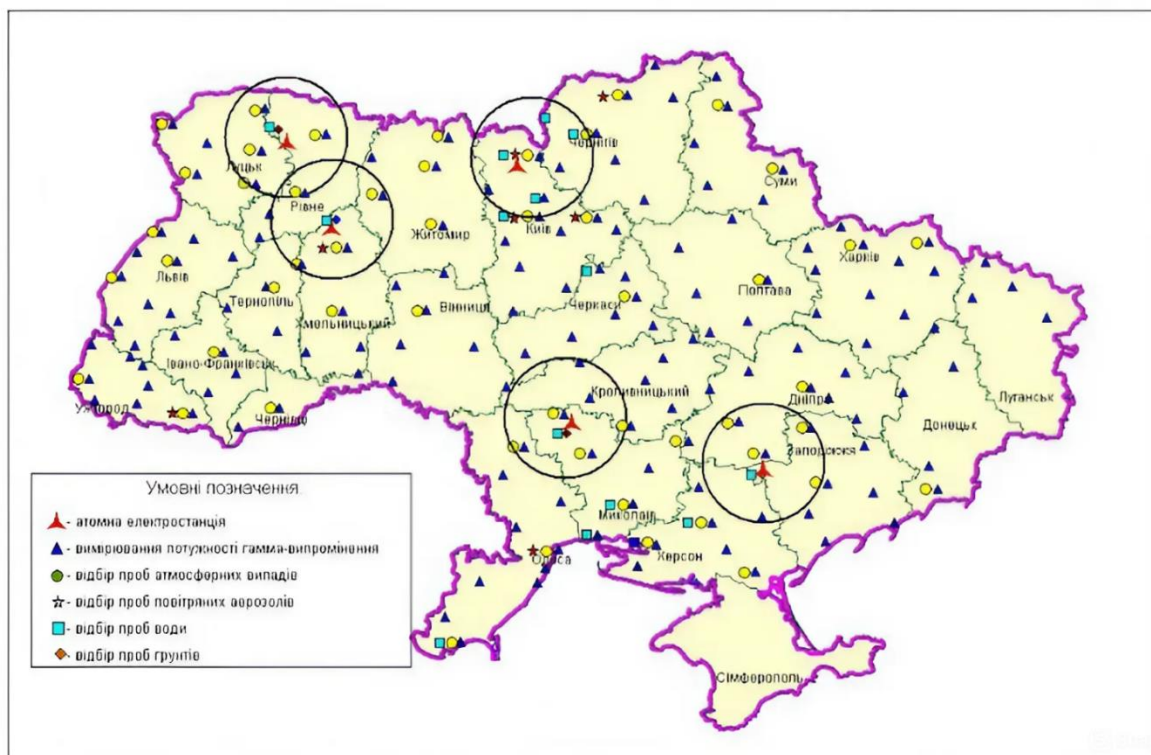


Рис. 2.3. Карта-схема розташування пунктів спостережень гідрометеослужби за радіоактивним забрудненням природного середовища на території України <https://www.uatom.org/2021/09/28/monitoring-radioaktivnih-rechovin-u-vodojmah-ta-gruntah.html>

Постійний моніторинг радіаційної безпеки на підприємствах урановидобувної та уранопереробної промисловості є ключовим елементом забезпечення екологічної безпеки та здоров'я населення. Використання сучасних методів контролю, таких як автоматизовані системи з датчиками, лабораторні дослідження, інтеграція технологій IoT та хмарних сервісів, дозволяє ефективно виявляти та запобігати радіаційним загрозам. Впровадження таких систем в

Україні сприяє підвищенню рівня радіаційної безпеки та забезпечує стале функціонування підприємств уранової галузі.

2.4. Аналіз підприємств урановидобувної та уранопереробної промисловості України: розташування, екологічний вплив, наслідки для населення

Уранова промисловість України відіграє важливу роль у забезпеченні енергетичної незалежності держави, оскільки уран є ключовим паливом для атомних електростанцій. Однак діяльність урановидобувних та уранопереробних підприємств супроводжується значним екологічним впливом, що може негативно позначатися на навколишньому середовищі та здоров'ї населення. У цьому розділі проаналізуємо розташування основних підприємств цієї галузі в Україні, їхній вплив на екосистеми та найближчі населені пункти.

Основні запаси урану в Україні зосереджені в Кіровоградській області, що робить її центром урановидобувної промисловості країни. Серед основних підприємств можна виділити:

1. Східний гірничо-збагачувальний комбінат (СхідГЗК)

Розташований у місті Жовті Води Дніпропетровської області, СхідГЗК є єдиним в Україні підприємством, яке здійснює видобуток та переробку уранових руд. Комбінат експлуатує кілька шахт, серед яких: шахта «Смолінська», що знаходиться в смт Смоліне Маловисківського району Кіровоградської області, шахта «Інгульська» - розташована поблизу міста Кропивницький, шахта «Новокостянтинівська», яка знаходиться в Маловисківському районі Кіровоградської області. Ці шахти забезпечують видобуток уранової руди, яка надалі переробляється на СхідГЗК для отримання уранового концентрату.

2. Придніпровський хімічний завод (ПХЗ).

Розташований у місті Кам'янське (колишній Дніпродзержинськ) Дніпропетровської області, у період з 1949 по 1991 роки здійснював переробку урановмісних концентратів та руд. На

території заводу та прилеглих територіях було створено кілька хвостосховищ, де накопичено близько 42 млн тонн відходів переробки уранових руд [16]. Оскільки зупинення уранового виробництва в 1992 році відбулося позапланово: без необхідної підготовки і необхідних ресурсів, а також без проведення важливих заходів з очищення та перепрофілювання підприємства, – у деяких спорудах уранового виробництва досі залишаються приміщення, технологічні апарати, обладнання з високим вмістом залишків радіоактивних матеріалів (рис. 2.4). Наприклад, висохлі комплексні радіоактивні розчини та інші небезпечні залишки виробництва досі містяться в екстракційних колонах, пульпопроводах і апаратах споруд №103, №104, №2Б, 6, 95 та ін., будучи фактичними і потенційними джерелами з дуже високими рівнями опромінення персоналу. Тому робота в таких приміщеннях і демонтаж обладнання в них вимагають особливих заходів безпеки.

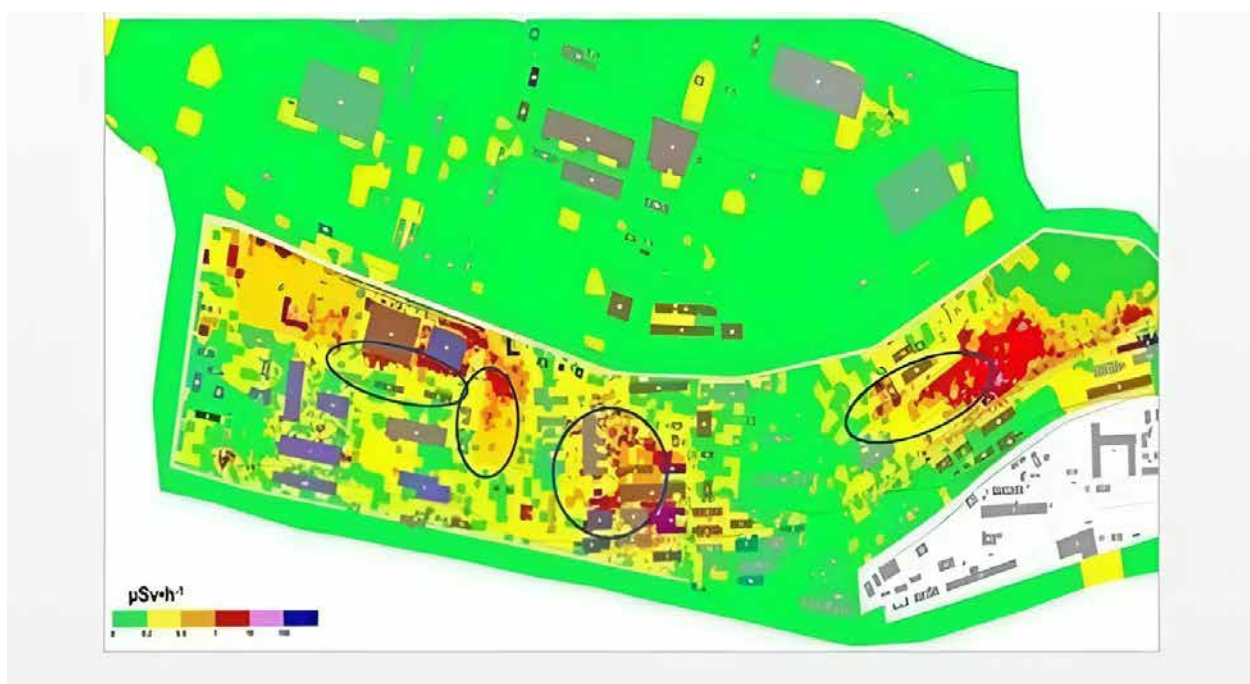


Рис. 2.4. Просторовий розподіл ПЕД (потужності еквівалентної дози гамма опромінення) в мкЗв/год на території проммайданчика колишнього ВО «ПХЗ»

[PHZ-Ukr. \(1\).pdf](#)

Проблема ускладнюється й тим, що на деяких апаратах відсутні захисні кришки, радіоактивний матеріал розсипаний на підлозі і поверхні обладнання; з фрагментів зрізаних труб буває просипаються залишки уранового концентрату

(так званий «жовтий кек») та інші забруднені матеріали. В будівлях на багатьох поверхах відсутні вікна, є проломи в стінах, у багатьох місцях протікає дах (дивіться фото, як один з прикладів оцінки поширення радіоактивних матеріалів з будівлі №103 на проммайданчику). Це призводить до того, що радіоактивний матеріал продовжує поширюватися не тільки всередині будівель, але й на прилеглі території, утворюючи додаткові ризики для працюючих на проммайданчику людей. Ось чому тут дуже важливо проводити постійний радіаційний моніторинг, продовжувати підготовчі роботи до майбутніх масштабних інженерних заходів з очищення територій та споруд [38].

Екологічний вплив урановидобувних та уранопереробних підприємств є значним і охоплює низку серйозних екологічних проблем. Однією з основних загроз є радіоактивне забруднення, оскільки видобуток та переробка уранових руд супроводжуються утворенням відходів з підвищеним рівнем радіоактивності. Хвостосховища, де накопичуються ці відходи, можуть стати джерелами забруднення ґрунтів, водних ресурсів та атмосфери. Наприклад, хвостосховища ПХЗ містять значні обсяги радіоактивних речовин, що становлять потенційну загрозу для навколишнього середовища.

Слід також зауважити, що до 1991 року в уранових цехах «Придніпровського хімічного заводу» культура радіаційної безпеки була на досить високому рівні. Тому в таких будівлях і на прилеглих до них територіях забезпечувалися досить низькі рівні радіоактивного забруднення і прийнятні рівні безпеки. Проте після зупинки уранового виробництва і в умовах невизначеності з подальшим репрофілюванням підприємства, питання забезпечення радіаційної безпеки відійшли на другий план. Історія репрофілювання об'єктів та підприємств колишнього ВО «ПХЗ» заслуговує окремого дослідження, зокрема з позицій законодавства і нормативно-правового аналізу. Ймовірно, багатьох сучасних проблем з безпекою на цьому майданчику можна було б уникнути, якби розподіл об'єктів колишнього уранового виробництва і відповідальності за приведення їх у безпечний стан відбувся згідно з регуляторними вимогами і кращим міжнародним досвідом.

Крім того, уранові руди містять не лише радіоактивні елементи, а й важкі метали та інші токсичні сполуки, що спричиняють хімічне забруднення. Під час видобутку та переробки ці речовини можуть потрапляти в навколишнє середовище, забруднюючи ґрунти та водні об'єкти, що негативно позначається на місцевій флорі та фауні (рис. 2.5).

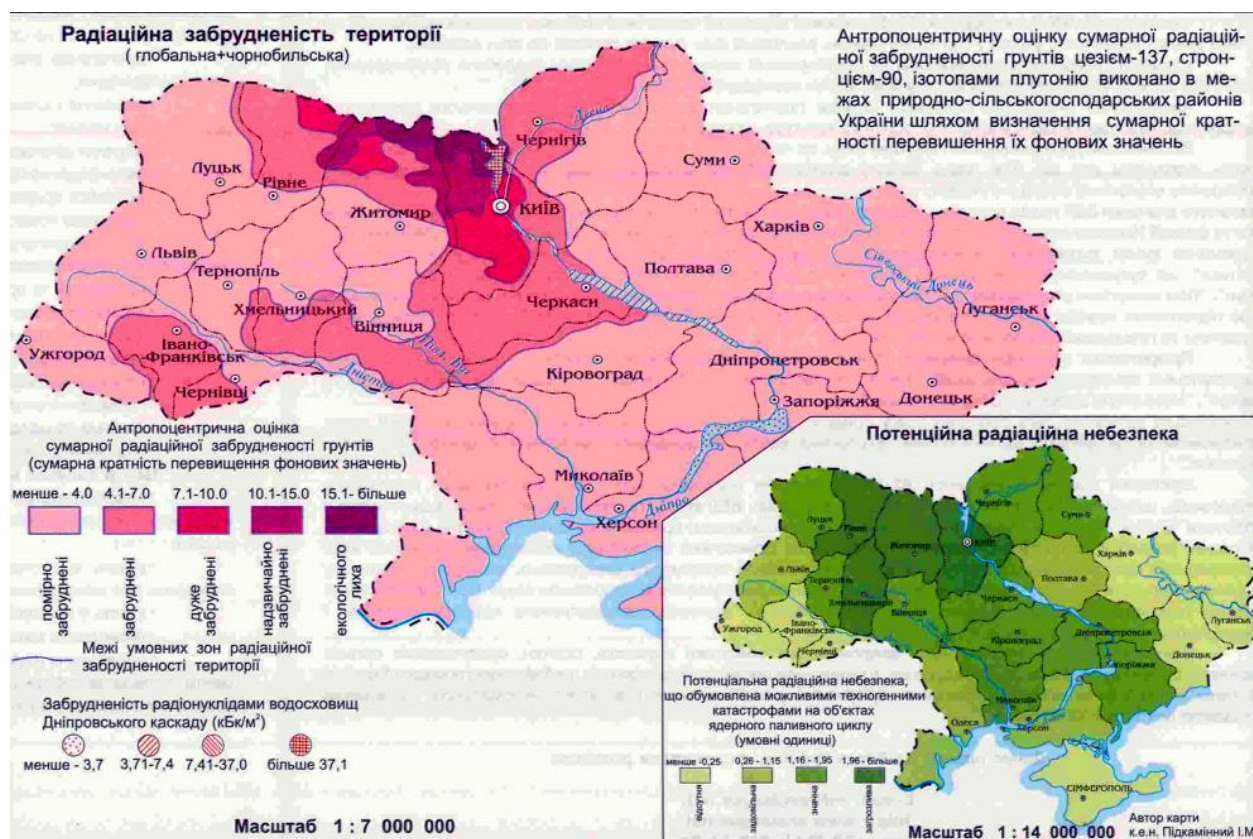


Рис. 2.5. Радіаційна забрудненість території України

<https://www.uatom.org/2021/09/28/monitoring-radioaktivnih-rechovin-u-vodojmah-ta-gruntah.html>

Окрім цього, урановидобувні підприємства спричиняють значні зміни у природному рельєфі, що веде до порушення ландшафтів та втрати біорізноманіття. Гірничі роботи перетворюють природні екосистеми на промислові зони з обмеженою екологічною цінністю, що ускладнює відновлення територій після завершення виробничої діяльності.

Населення, що проживає поблизу урановидобувних та уранопереробних підприємств, зазнає значного негативного впливу, пов'язаного не лише з екологічними ризиками, а й із серйозними соціально-економічними наслідками.

Однією з основних загроз є ризик радіаційного опромінення. Підвищений рівень радіації, спричинений діяльністю таких підприємств, може призводити до зростання кількості онкологічних захворювань та інших радіаційно-обумовлених хвороб серед місцевого населення. Окрім цього, серйозну проблему становить забруднення водних ресурсів, адже радіоактивні та токсичні речовини можуть проникати у поверхневі та підземні води. Це безпосередньо впливає на якість питної води та може спричинити різні захворювання, пов'язані з вживанням забрудненої рідини.

Водночас вплив уранової промисловості не обмежується лише екологічними наслідками – вона також серйозно впливає на соціально-економічні аспекти життя населення. Одним із найвідчутніших наслідків є зниження якості життя. Забруднення довкілля та підвищений рівень радіації у регіонах, де розташовані уранові шахти та переробні комбінати, змушують людей обмежувати перебування на відкритому повітрі, використовувати привізну воду, а також миритися зі зниженням рівня здоров'я та скороченням тривалості життя [5].

Крім того, діяльність уранових підприємств спричиняє зменшення сільськогосподарського потенціалу регіонів. Забруднення ґрунтів і води важкими металами та радіоактивними елементами робить землі непридатними для ведення сільського господарства, що не лише послаблює продовольчу безпеку, а й завдає економічних збитків місцевим громадам, традиційно зайнятим у фермерстві.

Ще однією проблемою є необхідність переселення населення з територій із критичним рівнем радіації. Високий рівень забруднення змушує державу розглядати варіанти евакуації мешканців, проте реалізація таких програм часто ускладнена фінансовими та бюрократичними перешкодами. Досвід Чорнобильської зони відчуження показує, що переселення вимагає значних

ресурсів і має довготривалі наслідки для економіки та соціальної структури країни [1].

Останнім, але не менш важливим фактором є економічна нестабільність та безробіття. Закриття шахт або обмеження діяльності уранових комбінатів через екологічні та соціальні ризики часто призводять до зростання рівня безробіття. Для багатьох регіонів, таких як Кіровоградська та Дніпропетровська області, уранова промисловість є одним із ключових джерел робочих місць. Проте її подальший розвиток вимагає нових підходів до моніторингу, контролю та мінімізації негативних наслідків [18].

Аналіз підприємств урановидобувної та уранопереробної промисловості України свідчить про суттєвий екологічний та соціально-економічний вплив цієї галузі. Основними проблемами є радіаційне забруднення, негативний вплив на здоров'я населення, деградація навколишнього середовища, забруднення водних ресурсів, зменшення сільськогосподарського потенціалу та соціальні проблеми, пов'язані з безробіттям та переселенням населення.

Для мінімізації цих наслідків необхідно розвивати сучасні методи моніторингу та контролю за радіаційною безпекою, а також впроваджувати новітні екологічні технології на підприємствах. Крім того, важливо враховувати соціально-економічний аспект розвитку регіонів та забезпечувати належну підтримку населенню, яке проживає в зонах підвищеного радіаційного ризику.

РОЗДІЛ 3. ЗАХОДИ ЗМЕНШЕННЯ РАДІАЦІЙНОГО ВПЛИВУ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ГАЛУЗІ

3.1. Сучасні технології радіаційного захисту на уранових підприємствах

З огляду на високу радіаційну небезпеку урановидобувної та уранопереробної промисловості, сучасні підприємства цієї галузі зобов'язані впроваджувати технології, спрямовані на мінімізацію впливу іонізуючого випромінювання на персонал, населення та довкілля. Радіаційний захист реалізується як через технічні рішення, так і організаційні заходи відповідно до принципів міжнародних стандартів безпеки, зокрема документів МАГАТЕ, ICRP та НРБУ-97.

Одним з ключових напрямів захисту є локалізація джерел радіоактивного забруднення. Для цього використовуються герметичні системи транспортування та зберігання уранової руди, закриті контейнери для проміжного зберігання відходів, а також пилогазоочисні установки. Системи вентиляції шахт проєктуються з урахуванням ефективного виведення радону та його дочірніх продуктів розпаду з робочих зон, а сучасні фільтраційні системи забезпечують багаторівневе очищення повітря [29].

Застосування дистанційно керованих технологій є ще одним сучасним рішенням у сфері радіаційного захисту. Зокрема, в процесі гідродинамічного розщеплення уранових руд широко впроваджуються автоматизовані системи керування буровими і переробними установками, що дає змогу мінімізувати перебування персоналу у небезпечних зонах та зменшити дозові навантаження [43].

Окрему роль відіграє екранування джерел випромінювання з використанням матеріалів з високою поглинальною здатністю — свинцю, бетону з баритовим наповнювачем, полімерів з включенням бору. Такі конструкції застосовуються на всіх етапах — від дроблення руди до транспортування

концентрату. При цьому активно використовуються інноваційні легкі захисні матеріали, зокрема композити з поліетиленовою матрицею, що містять нейтронопоглинальні речовини, які є ефективними для захисту від повільних нейтронів [47].

У шахтах активно впроваджуються моніторингові системи контролю концентрації радону, що працюють у режимі реального часу. Такі системи дозволяють швидко реагувати на перевищення гранично допустимих концентрацій і автоматично коригувати роботу вентиляційного обладнання. Персонал забезпечується індивідуальними дозиметрами, а результати дозиметричного контролю зберігаються в електронному реєстрі [10].

Особливо важливими є заходи з обробки та зберігання радіоактивних відходів. У сучасних умовах все більше підприємств переходять до застосування сухого сховища ВЯП (відпрацьоване ядерне паливо) та герметичних контейнерів з багаторівневою системою захисту. Відпрацьовані матеріали часто зберігаються у бетонних або металевих контейнерах із захистом від вологи та проникнення радіоактивних частинок у ґрунт. Особливою вимогою є наявність моніторингових свердловин навколо сховищ, які дозволяють виявити потенційне просочування небезпечних речовин [7].

У контексті охорони довкілля активно впроваджуються технології реабілітації територій, зокрема рекультивация хвостосховищ, створення біологічних бар'єрів (фітомеліорація), зміцнення дамб із використанням геотекстильних матеріалів та біосорбентів. На основі досвіду Казахстану, Канади та України розробляються ландшафтно-геохімічні моделі поводження із забрудненими ділянками, які дозволяють прогнозувати переміщення радіонуклідів і вчасно реагувати на ризики [11].

Одним із новітніх напрямів розвитку є впровадження біотехнологій радіаційного захисту. Зокрема, вивчається здатність певних мікроорганізмів до біомінералізації та зв'язування радіоактивних елементів, що дозволяє зменшити їх мобільність у ґрунтових та водних середовищах. У лабораторіях Інституту проблем безпеки АЕС НАН України проводяться дослідження щодо

застосування штамів бактерій, які переводять уран у малорозчинні форми, зменшуючи його токсичність та міграційну здатність [13].

Усі наведені технології можна згрупувати за напрямками радіаційного захисту. У табл. 3.1 представлено узагальнення сучасних підходів, що застосовуються на урановидобувних і уранопереробних підприємствах України.

Таблиця 3.1.

Сучасні технології радіаційного захисту на уранових підприємствах України

Напрямок захисту	Опис технологій	Очікуваний ефект
Локалізація джерел забруднення	Герметичні системи транспортування, закриті контейнери, пилогазоочисні установки	Запобігання поширенню радіоактивних речовин у повітрі та на поверхні
Системи вентиляції	Проектування шахтної вентиляції з фільтрами, виведення радону	Зменшення концентрації радону у робочій зоні
Автоматизація процесів	Дистанційне керування буровими і переробними установками	Зменшення дозових навантажень на персонал
Екранування джерел випромінювання	Свинець, баритовий бетон, полімери з бором, легкі композити	Захист від γ -випромінювання та нейтронів
Моніторинг і дозиметрія	Радон-монітори, індивідуальні дозиметри, електронні реєстри	Контроль рівня опромінення персоналу
Зберігання відходів	Сухі сховища, герметичні бетонні/металеві контейнери, моніторингові свердловини	Запобігання забрудненню ґрунту та підземних вод
Рекультивация територій	Фітомеліорація, геотекстиль, біосорбенти, моделювання	Відновлення екосистем, запобігання міграції радіонуклідів
Біотехнології захисту	Бактерії для осадження урану у малорозчинні форми	Біологічна нейтралізація радіоактивних елементів

Таким чином, сучасні підходи до забезпечення радіаційної безпеки у сфері урановидобутку та переробки охоплюють широкий спектр технологічних, біологічних та організаційних заходів. Їх впровадження дозволяє не лише знижувати рівень опромінення персоналу та навколишнього середовища, а й формувати нову екологічно орієнтовану модель функціонування підприємств. У майбутньому ключову роль відіграватиме інтеграція екологічного моніторингу, цифрових технологій та міжнародних практик в національну систему контролю радіаційної безпеки.

3.2. Модернізація виробництва та впровадження екологічних технологій

Урановидобувна та уранопереробна промисловість України наразі перебуває на етапі трансформації, коли забезпечення радіаційної безпеки та охорона довкілля виходять на перший план. З огляду на складну екологічну ситуацію, зношеність основних фондів та виклики, пов'язані з міжнародними екологічними стандартами, модернізація технологічних процесів є пріоритетним завданням галузі. За даними ДП «СхідГЗК», більшість технологічного обладнання на українських уранових шахтах експлуатується понад 30 років, що значно знижує ефективність процесів вилучення урану та збільшує екологічні ризики [12]. Підвищене споживання води, використання застарілих реагентів, надмірне пиловиділення та утворення великої кількості твердих і рідких відходів є типовими проблемами старої інфраструктури.

Одним з ключових шляхів екологізації уранового виробництва є впровадження підземного вилуговування (ПВ) — методу, при якому кислота або лужний реагент подається безпосередньо в поклад руди через свердловини, а потім розчинений уран витягується на поверхню. Цей метод має суттєві

переваги: відсутність розкривних робіт, мінімальні обсяги порушених земель, нижчий рівень радіаційного впливу на поверхні [42]. На низці об'єктів в Україні вже проводяться дослідження щодо оптимізації ПВ з використанням біолучу — застосування мікроорганізмів, які сприяють розчиненню уранових мінералів. Такі технології не лише зменшують потребу в токсичних реагентах, а й забезпечують локалізовану дію, знижуючи ймовірність хімічного забруднення ґрунтових вод [14].

У процесі видобутку урану на глибоких горизонтах утворюється велика кількість шахтних вод, часто з підвищеним вмістом радіонуклідів, солей важких металів і сульфатів. Сучасні системи очищення шахтних вод включають багатоступеневу схему: коагуляція, фільтрація, сорбція на активованому вугіллі, йонообмін, осадження з вапном. Крім того, у рамках проєктів екологічної модернізації впроваджується зворотний осмос, що дозволяє повертати значну частину води у виробничий цикл [6].

Хвостосховища — одна з найпроблемніших екологічних складових уранової промисловості. З метою зменшення екологічного навантаження проводяться роботи з їх рекультивації. Сучасні підходи передбачають накриття хвостів геотекстильними матеріалами, створення інженерно-біологічних бар'єрів, висадку фіторе mediaційних рослин, що можуть акумулювати радіонукліди та стабілізувати ґрунт [11]. Також актуальним є впровадження сухих технологій зберігання радіоактивних відходів, що мінімізують ризик витоку радіонуклідів у водне середовище. Деякі підприємства переходять до формування монолітних матриць із цементом або бітумом, які значно підвищують довготривалу стабільність сховищ [16].

Модернізація включає також енергоефективні рішення: впровадження частотних перетворювачів на насосних станціях, заміна освітлення на світлодіодне, використання теплових насосів для обігріву шахтних комплексів. Деякі підприємства розглядають використання альтернативних джерел енергії, зокрема сонячних панелей, для живлення систем моніторингу та освітлення [53].

Застосування цифрових систем моніторингу радіаційного фону, витоку реагентів, структурних змін дамб хвостосховищ значно підвищує безпеку. Використання дронів і супутникового моніторингу дозволяє виявляти зміну вологості, осідання ґрунтів і ризику порушення гідроізоляції [48].

Україна бере участь у міжнародних ініціативах, таких як «InSitu Remediation Project» (IAEA) та «ENVIRONET», які спрямовані на впровадження інноваційних технологій рекультивації та реабілітації забруднених уранових територій. Ці проекти підтримуються експертами МАГАТЕ, ЄС та програмами технічної допомоги [41].

У контексті глобалізації та інтеграції України до міжнародної спільноти забезпечення радіаційної безпеки є однією з найважливіших складових сталого розвитку країни. Зокрема, уранова промисловість, що є важливою частиною економіки, потребує впровадження новітніх технологій і методів для забезпечення екологічної та радіаційної безпеки. Вивчення міжнародного досвіду, зокрема таких країн, як Канада та Австралія, може суттєво вплинути на розвиток системи управління радіаційними ризиками в Україні.

Канада є однією з країн, яка має багатий досвід у сфері радіаційної безпеки, зокрема в сфері видобутку урану. Основою канадської системи є комплексний підхід, що поєднує законодавче регулювання, наукові дослідження, технічні рішення та активну участь громадськості в управлінні радіаційними ризиками. Одним із основних інструментів управління радіаційною безпекою в Канаді є Канадська радіаційна безпека (Canadian Nuclear Safety Commission, CNSC), яка здійснює контроль за всіма аспектами діяльності уранових підприємств: від ліцензування шахт до моніторингу радіаційного фону та опромінення працівників [32].

Окрім того, Канада активно застосовує методи підземного вилуговування урану, що значно зменшує екологічний вплив на навколишнє середовище, оскільки знижує кількість порушених земель та обсягів відходів. Це дозволяє зберегти екосистеми на територіях, де здійснюється видобуток, і зменшити вплив на місцеві водні ресурси. Канадські компанії, зокрема Cameco,

застосовують інноваційні методи біоремедіації, використовуючи мікроорганізми для очищення вод від радіоактивних забруднень [31].

Крім того, одним з важливих аспектів канадської системи є активне залучення громадськості до процесу планування та реалізації заходів з радіаційної безпеки. У Канаді регулярно проводяться громадські слухання та публікуються звіти про результати моніторингу і діяльності уранових компаній, що дозволяє забезпечити прозорість і підвищити рівень довіри серед населення [32].

Австралія є ще однією провідною країною світу, яка посідає лідерські позиції у сфері забезпечення радіаційної безпеки в контексті уранового видобутку. Завдяки поєднанню передових технологій, жорсткого регулювання та активної наукової діяльності, країна демонструє приклад відповідального та сталого підходу до управління радіоактивними матеріалами. Уранова промисловість Австралії суворо регулюється на федеральному та штатному рівнях, із впровадженням екологічних оцінок, систем ліцензування та багаторівневого моніторингу. Це забезпечує відповідність найвищим міжнародним стандартам безпеки, зокрема вимогам МАГАТЕ.

Одним із ключових елементів австралійської системи є впровадження інноваційних технологій, спрямованих на мінімізацію як екологічних, так і радіаційних ризиків, пов'язаних із видобутком та переробкою урану. Австралійські підприємства застосовують технології, які дозволяють зменшити обсяги відходів, знизити радіаційне навантаження на персонал і навколишнє середовище, а також забезпечити відновлення земель після завершення гірничих робіт. Серед таких інновацій – біосорбція, тобто використання мікроорганізмів (бактерій, грибів, водоростей) для очищення води від радіоактивних домішок. Ця технологія активно вивчається та впроваджується в Австралії з метою очищення стічних вод, які утворюються внаслідок урановидобутку, зокрема в регіонах Північної Території та Південної Австралії [54].

Застосування біосорбції дозволяє не лише знижувати концентрацію радіоактивних елементів у воді, але й забезпечує ефективне очищення

забруднених територій, включно з ґрунтами й підземними водами. У поєднанні з іншими методами біоремедіації це створює умови для екологічного відновлення територій після завершення промислової діяльності. Таким чином, Австралія формує модель урановидобутку, що не лише відповідає принципам радіаційної безпеки, а й слугує прикладом сталого природокористування.

Крім того, Австралія інвестує значні ресурси в розвиток інфраструктури, необхідної для безпечного зберігання та транспортування радіоактивних відходів. Відомий на міжнародному рівні Міжнародний центр зберігання радіоактивних відходів (International Radioactive Waste Storage Centre), розташований у глибоко стабільних геологічних формаціях країни, є одним із прикладів інфраструктури, що відповідає найвищим критеріям довготривалої безпеки. Сховище було спроектоване з урахуванням ризиків на багато десятиліть вперед, включаючи ризики землетрусів, корозії контейнерів, інфільтрації води та людського втручання. Інфраструктура базується на багатобар'єрній концепції, згідно з якою радіоактивні відходи ізольовані одразу кількома шарами фізичного та інженерного захисту [30].

Уряд Австралії також приділяє значну увагу розвитку нормативної та інституційної бази управління радіоактивними матеріалами. Створено низку спеціалізованих агентств і органів, зокрема Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency (ARPANSA), які відповідають за формування стандартів, контроль за їх дотриманням та координацію міжурядових ініціатив у сфері радіаційної безпеки. Ці інституції забезпечують прозорість процедур та інформування громадськості про рівень безпеки та заходи, що вживаються у сфері уранової промисловості.

Особливу роль у системі безпеки відіграє постійний моніторинг стану радіоактивних відходів. Австралійські урядові агентства впровадили багаторівневу систему контролю, яка включає дистанційне моніторингове обладнання, періодичний фізичний огляд сховищ, аналіз стану контейнерів та моніторинг стану навколишнього середовища – зокрема, повітря, води й ґрунту. Це дозволяє оперативно реагувати на будь-які зміни в технічному стані сховищ

та запобігати витоку радіоактивних речовин у довкілля. Така система також забезпечує можливість довгострокового контролю – протягом десятиліть після первинного захоронення відходів – що є однією з ключових умов міжнародних стандартів поводження з РАВ [30].

Таким чином, досвід Австралії у сфері забезпечення радіаційної безпеки та управління урановими ресурсами є прикладом комплексного, технологічно сучасного та відповідального підходу. Країна не лише демонструє високий рівень дотримання екологічних стандартів, а й інвестує в наукові дослідження, інфраструктуру та інституційну спроможність, забезпечуючи довготривалу безпеку для людей і природи. Її модель може бути адаптована іншими державами, які прагнуть реформувати власну політику у сфері урановидобутку, зменшуючи радіаційні ризики та підвищуючи екологічну стійкість.

Досвід Канади та Австралії має великий потенціал для впровадження в Україні з урахуванням національних особливостей. Ключовими напрямками, за якими Україна може покращити систему радіаційної безпеки, є:

1. Адаптація міжнародних стандартів до національного законодавства. Вивчення досвіду Канади та Австралії в розробці нормативно-правових актів у сфері радіаційної безпеки дозволяє створити ефективну систему управління радіаційними ризиками. Впровадження практик, таких як суворе ліцензування шахт і регулярні інспекції, може значно підвищити рівень безпеки;

2. Розвиток інноваційних технологій. Використання новітніх технологій, таких як підземне вилуговування урану і біоремедіація, може допомогти знизити екологічний вплив на навколишнє середовище. Це також включає застосування методів для очищення вод та ґрунтів, заражених радіоактивними елементами;

3. Громадське залучення та прозорість. Важливою складовою ефективною системи є залучення громадськості до процесу прийняття рішень. Прозорість у роботі з радіаційними відходами, публікація результатів моніторингу та регулярні громадські слухання допоможуть знизити соціальну напругу та підвищити довіру до державних і приватних компаній;

4. Інфраструктура для зберігання радіоактивних відходів. Створення спеціалізованих сховищ для радіоактивних відходів, які відповідають міжнародним стандартам, є ще одним важливим кроком у забезпеченні довгострокової безпеки.

Загалом, на основі досвіду Канади та Австралії, Україна може значно покращити свою систему радіаційної безпеки та адаптувати міжнародні практики до власних умов.

3.4. Альтернативні джерела енергії як спосіб зменшення потреби в урановидобувній промисловості

Зростання обсягів споживання енергії, спричинене процесами індустріалізації та урбанізації, протягом тривалого часу забезпечувалося за рахунок використання традиційних джерел енергії, серед яких важливе місце посідав уран, що слугував сировиною для потреб ядерної енергетики. Проте, зі зростанням глобальної уваги до екологічних загроз, таких як радіаційна небезпека, тривале забруднення довкілля та вичерпність природних ресурсів, дедалі актуальнішим стає питання відмови від ядерної енергетики та переходу до відновлюваних джерел енергії. Альтернативні джерела мають потенціал значно зменшити залежність від уранової промисловості, що, своєю чергою, знижує рівень екологічних ризиків [17].

Альтернативна енергетика включає широкий спектр рішень, серед яких найбільш поширеними є сонячна та вітрова енергетика, геотермальні джерела, біоенергетика та енергія води. Ці технології активно впроваджуються у розвинених країнах, які бачать у них інструмент не лише для декарбонізації економіки, а й для зміцнення енергетичної безпеки. Зокрема, у країнах Європейського Союзу, США, Канаді, Китаї та Японії були ухвалені довгострокові національні стратегії розвитку відновлюваної енергетики. Вони передбачають суттєве зменшення частки атомної енергії в енергетичному

балансі, а подекуди – і повну відмову від неї. Наприклад, Німеччина, одна з лідерок у цій сфері, в межах своєї програми «Energiewende» взяла курс на повну відмову від атомної енергетики до 2025 року, зосередившись на розвитку потужностей сонячних та вітрових електростанцій [39].

Україна також має значний природний потенціал для розвитку відновлюваної енергетики. Зокрема, на півдні країни спостерігається висока інсоляція, що створює сприятливі умови для ефективного використання сонячних панелей. Крім того, прибережні регіони характеризуються стабільними вітровими потоками, що дає змогу розвивати вітроенергетику. Завдяки поєднанню цих факторів, наша держава може поступово знижувати залежність від урановидобутку, розширюючи використання «зелених» джерел енергії. За даними Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України, у 2023 році частка відновлюваної енергетики в структурі національного енергобалансу вже перевищила 13%, і ця тенденція має стійкий потенціал до подальшого зростання [9].

Однією з ключових переваг відновлюваних джерел є їхня екологічна та радіаційна безпека. На відміну від ядерних установок, вітрові та сонячні електростанції не продукують радіоактивних відходів, не потребують транспортування та збагачення урану, а також не несуть загрозу аварійного радіаційного забруднення, що особливо актуально з урахуванням досвіду Чорнобильської та Фукусімської катастроф. Ці фактори зумовлюють високу привабливість альтернативної енергетики як у середньостроковій, так і в довгостроковій перспективі [40].

Світовий досвід свідчить, що перехід до відновлюваної енергетики є цілком реальним за умови наявності політичної волі, належного інституційного середовища, інвестицій у технології та розвитку відповідної інфраструктури. Успішні приклади таких трансформацій демонструють, що поступова відмова від уранової промисловості не лише можлива, а й економічно та соціально доцільна. Важливим елементом цієї трансформації є впровадження децентралізованих джерел генерації енергії, таких як домашні сонячні

електростанції, малі вітрові установки, локальні мікромережі. Вони не лише знижують навантаження на централізовані енергосистеми, а й підвищують енергетичну автономію окремих громад і домогосподарств.

Таким чином, розвиток альтернативної енергетики в Україні не лише відповідає викликам сьогодення, пов'язаним із забезпеченням енергетичної незалежності, а й є ефективним інструментом зниження екологічних і радіаційних ризиків. З огляду на наявні природні ресурси та глобальні тенденції, країна має всі передумови для успішного розвитку у цьому напрямі.

ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи було комплексно досліджено проблему радіаційної безпеки у контексті функціонування уранодобувної та уранопереробної промисловості в Україні. Проведене дослідження дозволяє зробити низку узагальнюючих висновків, що відображають як теоретичні положення, так і практичні аспекти екологічного стану територій, на які здійснюється радіоактивне навантаження з боку підприємств ядерного циклу. Актуальність проблеми підтверджується як глобальними екологічними трендами, так і конкретною екологічною ситуацією на території України, зокрема у Дніпропетровській, Кіровоградській, Миколаївській та Житомирській областях.

По-перше, встановлено, що уранова промисловість України є одним із найбільш екологічно небезпечних секторів гірничо-добувної галузі, оскільки її функціонування супроводжується утворенням значної кількості радіоактивних, хімічно токсичних і важкометалевих відходів. Найбільшу небезпеку становлять уранові шахти, хвостосховища, відвали збагаченої породи та очисні споруди, які є потенційними джерелами тривалого забруднення навколишнього середовища. Особливе занепокоєння викликає застаріла інфраструктура багатьох об'єктів, що не відповідає сучасним вимогам екологічної безпеки.

По-друге, на основі вивчення нормативно-правової бази було виявлено, що законодавче регулювання у сфері радіаційної безпеки в Україні є недостатньо ефективним. Хоча наявні документи (Закони України, державні санітарні правила та норми, стандарти) формально охоплюють основні аспекти регулювання, на практиці спостерігається низький рівень їх дотримання, недостатній контроль з боку державних органів та фрагментарність екологічного моніторингу на підприємствах уранового комплексу. Крім того, спостерігається відставання українського законодавства від міжнародних стандартів та рекомендацій МАГАТЕ.

Третім важливим аспектом є опис та аналіз технологічних процесів добування й переробки уранової руди, які передбачають декілька стадій, кожна з яких супроводжується викидом радіонуклідів, зокрема урану-238, радону-222, торію-232, а також важких металів. Експлуатація таких об'єктів без сучасних систем очищення та захисту призводить до постійного та кумулятивного забруднення довкілля, що підтверджується даними екологічного моніторингу. За результатами численних досліджень, більшість із цих процесів в Україні базується на застарілих технологіях, що значно підвищує ризики для довкілля та здоров'я людини.

У ході дослідження було встановлено, що основними джерелами радіоактивного забруднення є хвостосховища (накопичувачі рідких і твердих відходів переробки уранової руди), шахтні води, пил з поверхні відвалів, а також інфільтрація радіонуклідів у ґрунтові води. Значна частина територій, прилеглих до таких об'єктів, демонструє підвищений рівень гамма-фону, а концентрації радіонуклідів у воді та ґрунтах часто перевищують допустимі нормативи. Виявлено, що екологічний вплив триває роками навіть після зупинки або консервації підприємств, що зумовлює необхідність довгострокового екологічного контролю.

Оцінка екологічних наслідків діяльності підприємств уранової галузі свідчить про наявність низки серйозних проблем: деградація ґрунтів, вторинне забруднення водних об'єктів, зниження біорізноманіття, а також ризики для здоров'я людей. Найбільш вразливими є працівники підприємств, мешканці прилеглих населених пунктів, а також діти, які мають вищу чутливість до дії іонізуючого випромінювання. Зафіксовано зростання кількості онкологічних хвороб, генетичних порушень та імунологічних збоїв у регіонах, прилеглих до уранових об'єктів.

У результаті аналізу було обґрунтовано доцільність запровадження комплексу практичних заходів з мінімізації впливу радіаційного забруднення, зокрема: удосконалення систем поводження з радіоактивними відходами, рекультивація та консервація хвостосховищ, впровадження сучасних технологій

очищення шахтних вод, встановлення санітарно-захисних зон, а також створення локальних систем попередження забруднення навколишнього середовища. Особливо актуальним є впровадження інноваційних підходів до екологічної модернізації промисловості в рамках національної стратегії з екологічної безпеки.

Окрему увагу в роботі приділено пропозиціям щодо вдосконалення системи екологічного моніторингу. Запропоновано розширити кількість постів спостереження, застосовувати дистанційні методи зондування Землі, інтегрувати ГІС-технології та автоматизовані системи збору екологічної інформації. Важливо забезпечити відкритість та доступність даних для громадськості, що сприятиме посиленню екологічної свідомості та залученню громад до контролю за станом навколишнього середовища. Лише поєднання наукових підходів, державного контролю та громадянської активності дозволить забезпечити належний рівень радіаційної безпеки в Україні.

Отже, результати проведеного дослідження підтверджують необхідність перегляду пріоритетів державної екологічної політики щодо уранової промисловості, орієнтації на сталий розвиток, екологічну безпеку та охорону здоров'я населення. Досягнута мета дослідження та виконані завдання дозволяють вважати кваліфікаційну роботу завершеною, а її положення — обґрунтованими та практично значущими. Здобуті результати можуть бути використані в подальших наукових дослідженнях, освітній діяльності, розробці локальних програм моніторингу та екологічної політики у сфері охорони довкілля.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аналіз екологічної ситуації в Україні та перспективи вирішення біологічних проблем, спричинених змінами навколишнього середовища. *Домашня сторінка*. URL: <http://dspace.nbuiv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/45108/24-Mishchuk.pdf?sequence=1> (дата звернення: 13.03.2025).
2. Бережной А. В. Радиационная физика: учебник. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2010. – 356 с. URL: <https://library.kpi.kharkov.ua/uk/node/837>
3. Бойко З. П., Семенишин М. З., Федечко М. І. Радіоекологія: підручник. – Львів: Львівський нац. ун-т ім. І. Франка, 2011. – 412 с. URL: <https://library.lnu.edu.ua/bibl/index.php/uk/>
4. Верховцев В.Г., Семенюк М.П., Вайло О.В., Ганевич А.Є., Студзінська А.О. Головні чинники забруднення ураном поверхневих та колодязних вод при розробці уранових родовищ Новокосянтинівського рудного поля // Збірник наукових праць Інституту геохімії навколишнього середовища. – 2018. – Вип. 28.
5. *Геохімія техногенезу geochemistry of technogenesis – (збірник наукових праць інституту геохімії навколишнього середовища)*. URL: <http://znp.igns.gov.ua/wp-content/uploads/2019/03/28.2.pdf> (дата звернення: 13.03.2025)
6. Гринько А.О. Технології очищення шахтних вод на урановидобувних підприємствах // Вода та водоочищення. – 2022. – №1(29). – С. 34–39. URL: <https://waterjournal.com.ua/article/2022-1/grynko>
7. Державна інспекція ядерного регулювання України. Сучасні методи поводження з радіоактивними відходами, 2023. URL: <https://snriu.gov.ua/>

8. Державна служба з надзвичайних ситуацій. Щорічна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні, 2022.

URL: <https://dsns.gov.ua/>

9. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. Поточний стан та перспективи розвитку відновлюваної енергетики в Україні.

URL: <https://saee.gov.ua/>

10. Державне підприємство "СхідГЗК". Система контролю за радіаційною безпекою на уранових шахтах.

URL: <https://www.vostgok.com.ua/>

11. Джангарачев Ю.І., Гайдашов Б.С. Рекультивация хвостосховищ уранової промисловості // Екологічна безпека. – 2020. – №2. – С. 55–63.

URL: <http://eco-journal.univer.kharkov.ua/article/view/2002>

12. ДП "СхідГЗК". Технічний стан уранової галузі України та напрями її модернізації.

URL: <https://vostgok.com.ua/>

13. Касьянова І.П., Красногор Н.І. Біомінералізація урану з використанням бактеріальних штамів // Вісник НАН України. – 2022. – №7. – С. 66–71.

URL: <https://visnyk-nanu.org.ua/uk/articles/bio-uran2022/>

14. Касьянова І.П., Красногор Н.І. Біотехнології вилучення урану з використанням мікроорганізмів // Вісник НАН України. – 2021. – №9. – С. 77–84.

URL: <https://visnyk-nanu.org.ua/uk/articles/uran-microbio-2021/>

15. Лисенко І. І. Радіаційна безпека та захист від іонізуючого випромінювання: навч. посіб. – Суми: СумДУ, 2021. – 178 с.

URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/85233>

16. МАГАТЕ. Управління твердими радіоактивними відходами. Safety Reports Series №69, Vienna, 2011.

URL: <https://www.iaea.org/publications/8569>

17. Міжнародне енергетичне агентство (IEA). World Energy Outlook 2023.

URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>

18. Можливі шляхи зниження радіотоксичності відпрацьованого ядерного палива АЕС - Енергетика: історія, сучасність і майбутнє. *Головна - Енергетика: історія, сучасність і майбутнє.*

URL: <http://energetika.in.ua/ua/books/book-4/part-1/section-7/7-4> (дата звернення: 13.03.2025).

19. Моніторинг радіаційної обстановки. *Головний центр спеціального контролю.* URL: https://gcsk.gov.ua/radionuklidnij-monitoring/?utm_source (дата звернення: 13.03.2025).

20. 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: 13.03.2025).

21. Наказ Міністерства охорони здоров'я України № 58 від 01.02.2005 «Про затвердження Державних гігієнічних нормативів «Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97)» з урахуванням Доповнення: ДГН 6.6.1.-6.5.001-98. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0058282-05#Text>

22. Норенко О. М., Ігнатенко О. М. Радіаційна безпека та захист в умовах підвищеного фону: монографія. – Кропивницький: ЦНТУ, 2020. – 182 с. URL: https://lib.kntu.kr.ua/cgi-bin/irbis64r_17/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=BUK&P21DBN=BUK&Z21ID=&Image_file_name=BUK/2020/2020_339.pdf

23. Радіаційний вплив відходів переробки уранових руд на гідросферу регіону | ІТТА INFO. *itta.info.* URL: https://itta.info/radiacijnij-vpliv-vidxodiv-pererobki-uranovix-rud-na-gidrosferu-regionu/?utm_source (дата звернення: 13.03.2025).

24. Радіоактивне забруднення. *Pidru4niki.* URL: https://pidru4niki.com/10560412/bzhd/radioaktivne_zabrudnennya?utm_source (дата звернення: 13.03.2025).

25. Савченко В. І. Радіаційна безпека: навч. посіб. – К.: Каравела, 2009. – 168 с.
URL: <http://irbis-nbuv.gov.ua/ulib/item/UKR0002105>
26. Система дозиметричного контролю та радіаційного моніторингу комплексу підприємств «Вектор» – УКРАТОМПРИЛАД. *УКРАТОМПРИЛАД – Корпорація "Українські атомні прилади та системи"*.
URL: https://uap.kiev.ua/archives/projects/система-дозиметричного-контролю-та-р-2?utm_source (дата звернення: 13.03.2025).
27. Тридцять п'ять років Чорнобильської катастрофи: радіологічні та медичні наслідки, стратегії захисту та відродження : Національна доповідь України. Київ, 2021. 283 с. ISBN 978-966-7656-10-2 Актуальні питання радіобіології – 2023 / Радіобіологічне товариство України. – Житомир, 2023. – 160 с.
28. Як радіація впливає на здоров'я. *Екодія*.
URL: https://ecoaction.org.ua/iak-radiatsiia-vplyvaie.html?utm_source (дата звернення: 13.03.2025).
29. Ярошенко Ф. Т. Основи радіаційної безпеки: навч. посіб. – К.: Центр учбової літератури, 2015. – 296 с.
URL: <https://cul.com.ua/product/osnovi-radiatsiynoi-bezpeki-navchalniy-posibnik/>
30. Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency. Radioactive Waste Management in Australia.
URL: <https://www.arpsa.gov.au/>
31. Cameco Corporation. Environmental Responsibility and Radiation Safety.
URL: <https://www.cameco.com/>
32. Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC). Radiation Protection in the Uranium Mining Sector.
URL: <https://nuclearsafety.gc.ca/>
33. CANCER IN UKRAINE 2022-2023 - Incidence, mortality, prevalence and other relevant statistics - Bulletin of the National Cancer Registry of Ukraine Vol.25. *National Cancer Registry of Ukraine*.

URL: http://www.ncru.inf.ua/publications/BULL_25/index_e.htm (date of access: 13.03.2025).

34. Chaturvedi A., Jain V. Effect of Ionizing Radiation on Human Health. *INTERNATIONAL JOURNAL OF PLANT AND ENVIRONMENT*. 2019. Vol. 5, no. 03. P. 200–205. URL: <https://doi.org/10.18811/ijpen.v5i03.8> (date of access: 13.03.2025).

35. Elevated Minisatellite Mutation Rate in the Post-Chernobyl Families from Ukraine / Y. E. Dubrova et al. *The American Journal of Human Genetics*. 2002. Vol. 71, no. 4. P. 801–809. URL: <https://doi.org/10.1086/342729> (date of access: 13.03.2025).

36. EV.NMU.ORG.UA. Аналіз урановидобувних та уранопереробних підприємств України: розташування, екологічний вплив, наслідки для населення [Електронний ресурс]. – URL: <https://ev.nmu.org.ua> (дата звернення: 12.03.2025).

37. EVNUIR.VNU.EDU.UA. Вплив урановидобувних підприємств на довкілля та здоров'я населення [Електронний ресурс]. – URL: <https://evnuir.vnu.edu.ua> (дата звернення: 12.03.2025).

38. eVNUIR: Радіонукліди та важкі метали в ґрунтах і водах території радіоактивного забруднення Волинської області. *eVNUIR: Домівка*. URL: <http://evnuir.vnu.edu.ua/handle/123456789/15254> (дата звернення: 13.03.2025).

39. Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action. The Energy Transition in Germany ("Energiewende"). URL: <https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Dossier/energy-transition.html>

40. Greenpeace International. Renewable Energy vs Nuclear: Comparing Environmental Impacts. URL: <https://www.greenpeace.org/international/publication/renewables-vs-nuclear/>

41. IAEA. ENVIRONET – International Network on Environmental Management and Remediation. URL: <https://www.iaea.org/services/networks/environet>

42. IAEA. In Situ Leach Uranium Mining: An Overview of Operations. IAEA-TECDOC-1428, Vienna, 2004.
URL: <https://www.iaea.org/publications/6946>
43. IAEA. Management of Radioactive Waste from the Mining and Milling of Ores. Safety Guide No. WS-G-1.2, Vienna, 2002. – 48 p.
URL: <https://www.iaea.org/publications/6346>
44. IAEA. Radiation protection and safety in uranium mining. IAEA Safety Reports Series No. 122, Vienna, 2022. – 105 p.
URL: <https://www.iaea.org/publications/14762>
45. ICRP Publication 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. – Annals of the ICRP, 2007. – Vol. 37, №2–4. – 332 p.
URL: <https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20103>
46. Ionizing radiation and health effects. *World Health Organization (WHO)*.
URL: <https://dev-cms.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ionizing-radiation-and-health-effects> (date of access: 13.03.2025).
47. Loon L.R. et al. Evaluation of polymer-based radiation shielding materials // *Journal of Hazardous Materials*, 2021. – Vol. 402.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123513>
48. Lysenko M. et al. Integration of drone monitoring into tailing facilities management // *Journal of Environmental Engineering*. – 2023. – Vol. 149(3).
URL: <https://doi.org/10.1061/JEE.0002122>
49. Maltseva T., Shyshuta A., Lukashyn S. Modern Methods of Radiochemical Reprocessing of Spent Nuclear Fuel. *Nuclear and Radiation Safety*. 2019. No. 1(81). P. 52–57. URL: [https://doi.org/10.32918/nrs.2019.1\(81\).09](https://doi.org/10.32918/nrs.2019.1(81).09) (date of access: 13.03.2025).
50. *Official Document System - UN*.
URL: <https://documents.un.org/doc/undoc/gen/v24/049/32/pdf/v2404932.pdf> (дата звернення: 13.03.2025).

51. Omoruyi C. I., Oyem I. M., Odagwe A. A. Ionizing Radiations And Cancers. *African Journal of Health, Safety and Environment*. 2023. Vol. 4, no. 1. P. 132–140. URL: <https://doi.org/10.52417/ajhse.v4i1.442> (date of access: 13.03.2025).

52. Terokhin V. L., Stervoyedov M. G., Ridozub O. V. Application Of The IoT Technology and Cloud Services for Radiation Monitoring. *Control Systems and Computers*. 2021. No. 2-3 (292-293). P. 60–68. URL: <https://doi.org/10.15407/csc.2021.02.060> (date of access: 13.03.2025).

53. UNECE. Best Available Techniques (BAT) for Management of Tailings Facilities. – Geneva, 2020. URL: <https://unece.org/info/>

54. Ziegler, M. R., & Paxton, M. A. (2018). Environmental Control of Uranium Extraction. *Journal of Environmental Management*, 123, 567-576. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.02.012>