

О.М. Воробйов, В.О. Юрченко, А.І. Решетченко

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна

## МОНІТОРИНГ ЗАБРУДНЕННЯ ПІДЗЕМНИХ ВОД ТРИТІЄМ ПІСЛЯ РАДІАЦІЙНОЇ АВАРІЇ НА ПУНКТІ ЗАХОРОНЕННЯ РАДІОАКТИВНИХ ВІДХОДІВ

*Проаналізовано дані багаторічного моніторингу рівня забрудненості тритієм підземних вод у районі пункту захоронення радіоактивних відходів. Встановлено, що через 27 років після радіаційної аварії радіаційна обстановка в досліджуваному районі стабілізувалась. Сумарна активність тритію у водоносному горизонті зменшувалась і в 2023 р. у 89 % досліджуваних точок досягла екологічно безпечних значень.*

**Ключові слова:** пункт захоронення радіоактивних відходів, радіаційна аварія, тритій, водоносні горизонти, моніторинг, екологічна безпека.

### Постановка проблеми

Актуальним питанням в Україні є забезпечення радіаційної безпеки, особливо після аварії на Чорнобильській АЕС у 1986 році. Уряд України приділяє велику увагу контролю рівня радіації в навколишньому середовищі, а також регулярно проводить моніторинг радіаційної ситуації. Зокрема, національна служба з надзвичайних ситуацій України відповідає за радіаційний моніторинг і заходи з ліквідації можливих наслідків радіаційних аварій.

Україна також активно співпрацює з міжнародними організаціями, серед яких Міжнародне агентство з атомної енергії (МАГАТЕ), для забезпечення відповідної радіаційної безпеки та приділяє велику увагу безпеці ядерних установок і промислових об'єктів, щоб запобігти можливим радіаційним аваріям.

З метою управління радіоактивними відходами запроваджені сховища для захоронення високоактивних, середньоактивних і низькоактивних радіоактивних відходів. Основна мета таких сховищ – забезпечення безпеки для людей та довкілля, уникнення негативних наслідків від радіації й мінімізація ризиків поширення радіоактивного забруднення. У сховищах радіоактивних відходів зберігається велика кількість багатих на тритій радіоактивних відходів різного походження, що є потенційним джерелом потрапляння тритію в навколишнє природне середовище. Безпечне зберігання радіоактивних відходів та джерел іонізаційного випромінювання, що містять тритій, є нагальною проблемою для запобігання циркуляції тритію в природних та урбанізованих системах [1].

Одне з таких сховищ захоронення радіоактивних відходів розташоване на території Харківської області. Пункт захоронення радіоактивних відходів (ПЗРВ) Харківської міжобласної філії ДСП

«Об'єднання «Радон» має санітарно-захисну зону (СЗЗ) радіусом 1 км та зону спостереження (ЗС) радіусом 5 км. Найближчі населені пункти розташовані на відстані 3,5–5 км від ПЗРВ та потрапляють до зони спостереження. Для спостереження за рівнем забруднення підземних вод тритієм використовується 24 свердловини.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Тритій – радіоактивний ізотоп гідрогену, належить до найпоширеніших у природі радіонуклідів. Його концентрація у природних водах на кілька порядків величин вище проти концентрацій таких радіонуклідів, як  $^{90}\text{Sr}$  та  $^{137}\text{Cs}$ . Основним депо перебування тритію у природі служить вода, з якою він легко переміщається на великі відстані [2].

Період напіврозпаду тритію становить 12,6 року. Він є м'яким бета-випромінювачем з максимальною енергією 18,6 кеВ. Тритій утворюється як природним шляхом, так і штучним, техногенним – внаслідок роботи ядерних реакторів та інших галузей промисловості. Природна компонента тритію генерується у верхніх шарах атмосфери під дією космічних нейтронів. Окислюючись, тритій утворює оксиди НТО і  $\text{T}_2\text{O}$ , які зумовлюють деяку фонову величину питомої активності тритію у поверхневих водах на рівні приблизно 0,1–1,2 Бк/л. Ядерні випробування в атмосфері додали понад 500 кг ( $1,5 \cdot 10^{20}$  Бк) тритію, що призвело до зростання його кількості в опадах подекуди до кількох тисяч бекерелів на літр. Завдяки глобальному обігу води і радіоактивному розпаду з часом рівень тритію у довкіллі зменшився і на сьогодні несуттєво відрізняється від фонового [2–4].

Основним сучасним джерелом постійного надходження тритію в довкілля є викиди АЕС. Було підраховано, що тритій на атомних електростанціях за останні 30 років утворюється зі швидкістю приби-

лизно 0,08 кг/рік, що лише трохи менше, ніж швидкість його природного утворення (0,15–0,2 кг/рік). Це м'який  $\beta$ -випромінювач з  $T_{0,5} = 12,34$  року. Його пробіг у воді і, відповідно, тканинах організму становить лише 1 мкм [3, 4].

Через низку причин тритій займає особливе місце у питаннях забезпечення радіаційної безпеки АЕС. По-перше, вміст тритію в рідких скиданнях при нормальній роботі АЕС набагато перевищує за абсолютним значенням вміст усіх інших нуклідів, а в газоподібних викидах в довкілля кількість тритію поступається тільки обсягу радіоактивних благородних газів (РБГ). По-друге, на відміну від хімічно інертних РБГ, інкорпорований тритій ефективно включається до складу біологічної тканини, викликаючи мутагенні порушення, як за рахунок  $\beta$ -випромінювання середньої енергії 5,8 кеВ, так і при порушенні молекулярних зв'язків, викликаних заміною ізотопу гідрогену нейтральним гелієм, що утворилися в результаті розпаду тритію. По-третє, тритій має великий період напіврозпаду і внаслідок цього є глобальним забруднювачем природних комплексів. Ці та деякі інші особливості дозволяють віднести тритій до найбільш радіаційно небезпечних довговічних нуклідів, які здатні забруднювати біосферу не тільки в районі безпосереднього розміщення джерела, а й у регіональному масштабі [2, 5, 6].

Тритій може створювати внутрішнє радіаційне опромінення і несе відповідні ризики для здоров'я людей у тому разі, коли він вдихається, проковтується або проникає через шкіру. За наявності тритію весь людський організм піддається впливу бета-випромінювання. В організмі він існує у двох формах: вільної тритієвої води і органічно зв'язаного тритію, тобто такого, що хімічно зв'язується з органічними речовинами тканин.  $T_{0,5}$  першої становить 9,7 доби, другого – від 30 до 450 діб залежно від речовини. Виведення здійснюється переважно через нирки, легені, шлунково-кишковий тракт, потові залози. Уражальна дія тритію визначається біологічною значимістю молекул, у які він включається. Особливо небезпечним є можливе його включення в молекули нуклеїнових кислот. На жаль, тритієва вода залишається маловивченою через труднощі кількісного вимірювання, ідентифікації та детектування її основного компонента – природного тритію [5, 6].

Директива 2013/51/Євратом встановлює параметричне значення тритію – 100 Бк/л [7]. Наразі тритій включений до списку контрольованих радіологічних параметрів, зазначених у новій Директиві ЄС щодо якості питної води [8].

Як зазначено, найбільш вагомим джерелом надходження тритію в середовище є атомна промисловість і ядерна енергетика, зокрема ядерні реактори

і заводи з регенерації ядерного палива (РП).

У процесі діяльності підприємств атомної промисловості тритій викидається у складі газо-аерозольних викидів в атмосферу та з рідкими відходами у поверхневі та підземні води, збільшуючи рівні вмісту цього радіонукліда у навколишньому середовищі. Постійне скидання підвищених концентрацій тритію підприємствами атомної промисловості у відкриті водоймища призводить до широкомасштабного їх забруднення ізотопом у результаті випаровування води та перенесення пари через повітряний простір.

Зараз проблема тритію набула високої гостроти через скид води з АЕС Фукусіма в океан. Проте в усьому світі в десятки разів більше тритію виробляється природним шляхом у нашій атмосфері космічними променями щороку. Загалом Китай зі своїх АЕС у 2020 р. злив в океан у 50 разів більше запланованих річних скидів тритію з АЕС Фукусіма [9, 10].

Будь-який викинутий тритій виявляється у вигляді тритієвої води (вода, в молекулах якої міститься тритій). Підвищення рівня тритію в навколишньому середовищі призводить до підвищення вмісту тритію в рослинах, організмах тварин та людей.

Нині проблему тритієвого забруднення водних екосистем у районах розміщення підприємств ядерно-паливного комплексу, об'єктів зберігання радіоактивних відходів можна вважати однією з ключових у радіоекології. При роботі АЕС, несанкціонованих витоків з ПЗРВ тритій надходить у навколишнє природне середовище та швидко мігрує з місць первинного забруднення, тому поодинокі та несистематичні виміри його не дозволяють виявити реальних масштабів забруднення водних систем. У зв'язку з цим необхідно проводити регулярний моніторинг тритію.

## Мета статті

Метою роботи є оцінка рівня безпеки підземних вод у районі пункту захоронення радіоактивних відходів за рівнем вмісту тритію на підставі даних багаторічного моніторингу.

## Виклад основного матеріалу

### Об'єкти дослідження.

Об'єктом дослідження був вміст тритію в підземній воді першого водоносного горизонту на території ПЗРВ (зони суворого режиму – ЗСР), санітарно-захисної зони – СЗЗ, в підземних водах колодязів за межами СЗЗ та в поверхневих водних об'єктах природного середовища. Для спостереження за рівнем забруднення підземних вод тритієм використовувалися 24 свердловини (рис. 1).

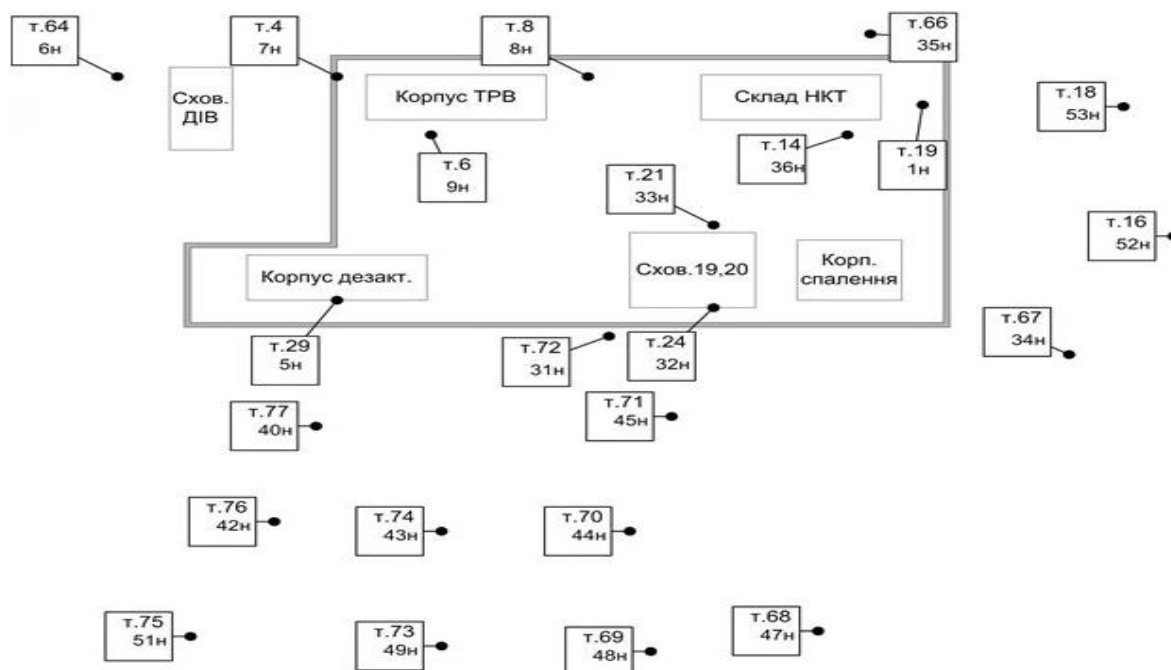


Рис. 1. Схема розташування свердловин спостереження на ПЗРВ

#### Метод дослідження.

Для визначення активності тритію у пробах води використовували «Методику виконання вимірювань об'ємної активності тритію у природних водних об'єктах з використанням рідинно-сцинтиляційного радіометра Triathler» (МВВ 12-001-2007). Вона розроблена ННЦ «Інститут метрології» та атестована відповідно до ГОСТ 8.010-99 для визначення питомої активності тритію у воді з використанням рідинно-сцинтиляційних радіометрів Triathler типу 425-034. Методика застосовна для всіх типів води (річки, озера, джерела, підземні води, морська вода та ін.) з об'ємною активністю тритію до  $10^6$  Бк/л і призначена для моніторингових досліджень тритію в регіоні розташування АЕС з моменту будівництва та до закриття, а також для інших екологічних досліджень.

Методика забезпечує вимірювання об'ємної активності тритію в лічильних зразках, приготованих з об'єктів зовнішнього середовища з межами основної відносної похибки вимірювань від  $\pm 30\%$  до  $\pm 50\%$  при довірчій ймовірності  $P = 0,95$  у діапазоні активності від 1 Бк до  $10^6$  Бк. Основною перевагою рідинно-сцинтиляційного методу є можливість детектування чистих бета-випромінювачів з низькою енергією, серед яких тритій.

Визначення питомої активності тритію у воді ґрунтується на вимірі сумарного бета-рахунку за допомогою рідинно-сцинтиляційних радіометрів, які забезпечують безпосередній контакт вимірюваного зразка (диспергування або розчинення) з рідким сцинтилятором. Принцип роботи рідинно-сцинтиляційного радіометра Triathler типу 425-034 заснований на взаємодії бета-випромінювального

радіонукліда та сцинтилятора – компонента сцинтиляційної суміші. Сцинтилятор перетворює іонізаційне випромінювання від радіонукліда на фотони (сцинтиляція). Інтенсивність світла, що виробляється під час сцинтиляції, пропорційна початковій енергії бета-частинки. Для вимірювання тритію можна використовувати різні типи рідинно-сцинтиляційних радіометрів, застосування яких залежить від рівня питомої активності тритію [11].

#### Результати та обговорення.

У 1997 р. під час проведення планового радіаційного контролю підземних вод ПЗРВ ХДМСК було виявлено значне перевищення допустимої концентрації тритію у свердловині на території підприємства.  $PC_b^{ingest}$  для тритію дорівнює  $8,1 \cdot 10^7$  Ку/л ( $3 \cdot 10^4$  Бк/л) [12]. За масштабами ця радіаційна аварія належить до класу локальних комунальних аварій.

Відповідно до технічної документації, радіоактивні відходи, що містять тритій, знаходяться в декількох сховищах БРВ, ТРВ і РРВ, які розташовані в зоні суворого режиму контролю.

Виконані науково-дослідні роботи [13, 14] визначили джерела надходження тритію у водоносний горизонт, розмір осередку та ступінь забруднення підземних вод. Було проведено роботи з ліквідації аварії та визначено їх ефективність, а також виконано роботи з реконструкції наявних та спорудження додаткових свердловин для моніторингу рівня забруднення тритієм підземних вод.

Відповідно до досліджень [12–15], було виявлено, що тверді радіоактивні відходи, що містять тритій – це трубки нейронних генераторів, джерела бета-випромінювання для визначення товщини

плівок, джерела-іонізатори та ін. Унаслідок конденсації вологи та атмосферних опадів у сховищах було накопичено значну кількість води – 20 м<sup>3</sup>. Вона і була найбільш можливим джерелом надходження тритію у водоносний горизонт, бо газоподібний тритій, що виходить в процесі дифузії з відходів, які містять тритій, при проходженні шару води в результаті ізотопного обміну включається до складу молекул води. У процесі експлуатації сховищ твердих радіоактивних відходів значна частина тритієвої води зі сховищ ТРВ надійшла до зони аерації внаслідок утворення тріщин у стінках та дні сховища. Під час перенесення через зону аерації частина тритієвої води проникла через затрубний простір свердловини у водоносний горизонт. Тобто, на думку спеціалістів, реалізувалися два шляхи проникнення тритію у перший водоносний горизонт: 1-й – порівняно довгий через зону аерації; 2-й – відносно швидкий для невеликої величини активності через затрубний простір.

Для усунення наслідків радіаційної аварії, запобігання подальшому забрудненню природного середовища, а також для своєчасного виявлення на території ПЗРВ можливих впливів на підземні води та для контролю стану підземних частин сховищ РРВ та ТРВ у зоні техногенного впливу об'єкта визнано необхідним проведення реконструкції наявної мережі спостереження [12, 13].

У результаті виконаних робіт радіаційна обстановка в зоні аварії стабілізувалася і виключено забруднення водоносного горизонту за рахунок надходження поверхневих забруднених вод з району розташування сховищ радіоактивних відходів [12, 13, 15]. Створена мережа спостережних свердловин, що складається з 24 свердловин для контролю вмісту тритію в першому водоносному горизонті та спостереження за просторовим розподілом тритію у цьому горизонті.

Результати багаторічного моніторингу вмісту тритію у воді з наглядних свердловин, розташованих в зоні суворого режиму та СЗЗ, підземній воді колодязів та воді з поверхневих водоймищ представлено на рис. 2–4.

Як свідчать наведені дані, після аварійного скидання тритію з ПЗРВ (1997 р.) у 2005 р. його підвищена активність в першому водоносному горизонті спостерігається в зоні суворого режиму поблизу сховища радіоактивних відходів (свердловина 1н). З 2005 р. по наш час вміст тритію у воді цієї свердловини зменшився в 10 разів до  $3,53 \cdot 10^4$  Бк/л, можливо, через радіоактивний розпад, і в 2023 р. впритул наблизився до екологічно безпечного рівня ( $3 \cdot 10^4$  Бк/л). Загалом у 2005–2009 рр. осередок радіаційного забруднення (вміст тритію  $1,11 \cdot 10^4$ – $9,07 \cdot 10^5$  Бк/л) знаходився більшою частиною під промисловим майданчиком ПЗРВ (свердловини 1н, 32н, 36н) за виключенням свердловини 45н (вміст тритію до

$2,04 \cdot 10^5$  Бк/л), яка розташовується в СЗЗ. У подальшому зона з максимальною об'ємною активністю тритію (до  $3,4 \cdot 10^5$  Бк/л) змістилась в район місцезнаходження наглядних свердловин 31н, 32н, 45н (з них свердловини 31н та 45н розташовані в СЗЗ). Нині зона з максимальною об'ємною активністю тритію (до  $1,24 \cdot 10^5$ ) змістилась в зону наглядних свердловин 32н і 48н. Ці свердловини знаходяться в СЗЗ.

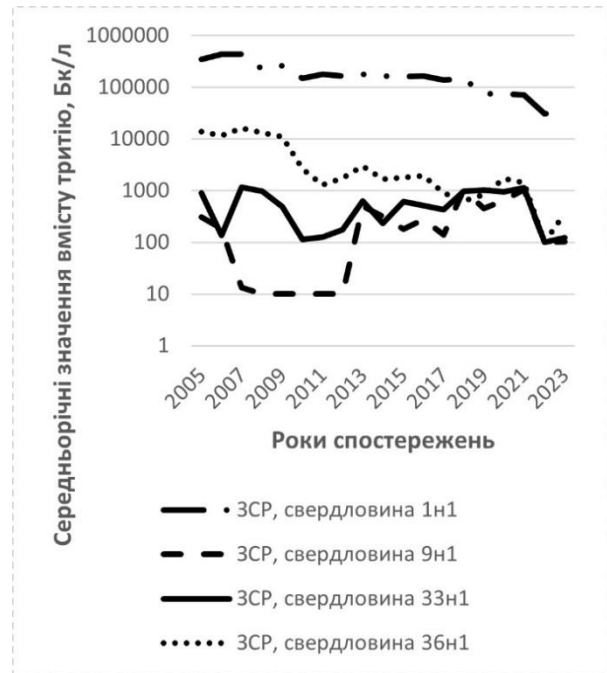


Рис. 2. Моніторинг вмісту тритію в свердловинах на території ЗСР

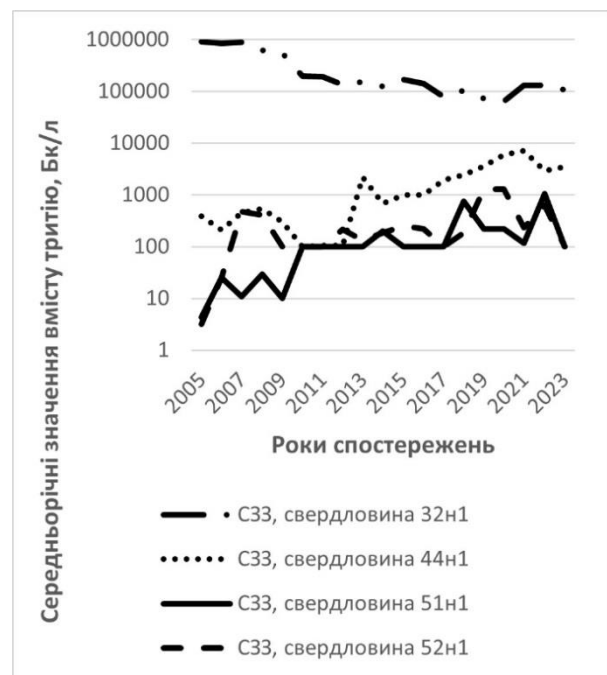


Рис. 3. Моніторинг вмісту тритію в свердловинах на території СЗЗ



Рис. 4. Моніторинг вмісту тритію у воді відкритих водоймищ та колодязів

Загальна тенденція моніторингу вмісту тритію у воді всіх 24 свердловин ПЗРВ ХДМСК з 2005 по 2023 рр. – поступове зменшення концентрації цього радіоактивного ізотопу. Воно відбувається на різних свердловинах з різного року, але є стійкою тенденцією. І в 2023 р. вода у 89 % з 24 наглядних свердловин має активність тритію на рівні нормативно допустимої.

У природних водних об'єктах (водосховище 1) вміст тритію з 2005 р. до 2021 р. поступово підвищувався (але не перевищуючи нормативно допустимі значення) від  $2,77 \cdot 10^0$  до максимального  $9,03 \cdot 10^2$  Бк/л у 2021 р. З 2022 р. вміст тритію у водосховищі 1 не перевищує  $10^2$  Бк/л. У водосховищі 2 вміст тритію з 2005 р. до 2021 р. також поступово підвищувався, не перевищуючи нормативно допустимі значення. Він досяг максимального значення  $7,88 \cdot 10^2$  Бк/л теж у 2021 р. З 2022 р. вміст тритію у водосховищі 2 не перевищує  $10^2$  Бк/л. У колодязі 1 вміст тритію у воді з 2005 по 2021 рр. поступово збільшувався в межах екологічно безпечного рівня і досяг максимуму  $4,52 \cdot 10^2$  Бк/л теж у 2021 р. З 2022 р. вміст тритію у воді колодязя 1 не перевищує  $10^2$  Бк/л. У колодязі 2 поступове підвищення вмісту тритію спостерігається з 2005 р. до 2021 р. в межах нормативно допустимих значень. У 2019 і 2021 рр. вміст тритію досягає максимуму ( $1,3 \cdot 10^3$  Бк/л), а в подальші роки зменшується. Отже, у воді об'єктів спостереження поза СЗЗ ПЗРВ – підземних (колодязі) та поверхневих (водосховища) джерел – вміст тритію не перевищував нормативно допустимий рівень протягом усього періоду спостереження. З 2015 р.

і по наш час у воді 24 (89 %) з 28 досліджених об'єктів: свердловин, природних водойм, колодязів – вміст тритію має екологічно безпечні значення.

## Висновки

Тритій – радіоактивний ізотоп водню – є м'яким бета-випромінювачем. Основним депо перебування тритію у природі служить вода, з якою він легко переміщається на великі відстані, ефективно включається до складу біологічних тканин, викликаючи мутагенні порушення.

У результаті радіаційної аварії на ПЗРВ, на думку спеціалістів, реалізувалися два шляхи проникнення тритію в перший водоносний горизонт: 1-й – порівняно довгий через зону аерації; 2-й – відносно швидкий для невеликої величини активності через затрубний простір.

Моніторинг вмісту тритію проводили на мережі наглядних свердловин, що складається з 24 свердловин для контролю вмісту тритію в першому водоносному горизонті, а також у підземній воді з колодязів та поверхневих водоймищ, розташованих за межами СЗЗ ПЗРВ.

Результати багаторічного моніторингу вмісту тритію у воді з цих свердловин, колодязів та природних об'єктів (водоймищ) свідчили, що через 27 років після радіаційної аварії радіаційна обстановка в досліджуваному районі стабілізувалась. Сумарна активність тритію у водоносному горизонті свердловин спостереження зменшується і наразі в усіх свердловинах крім трьох досягла нормативного рівня. Концентрація тритію за межами СЗЗ в підземних водах (колодязі) і в поверхневих водах (водоймища) за весь період моніторингу ніколи не перевищувала екологічно безпечний рівень.

## Література

1. Pushkarov O. Study of tritium migration and retention mechanisms in the geological environment (by the example of the kyiv radioactive waste storage facility) [Text] / O. Pushkarov, I. Sevruk // *Geochemistry of Technogenesis*. - 2021. - № 6. - P. 45-57.
2. Коваленко О. В. Моделювання міграції тритію в навколишньому середовищі [Текст] / О. В. Коваленко // *Математичне моделювання в економіці*. - 2015. - 2. - С. 51-64.
3. Mathur-De Vre, Molecular aspects of tritiated water and natural water in radiation biology [Text] / Vre Mathur-De, J Binet // *Progress in Biophysics and Molecular Biology*. - 1984. - 43. - P. 161-193.
4. Пушкар'ов О. В. Атмогеоміграція тритію зі сховищ радіоактивних відходів і його розподіл у ґрунтово-рослинному комплексі [Текст] / О. В. Пушкар'ов, Р. О. Пушкар'ова, С. О. Яковлев // *Мінеральні ресурси України*, - 2004. - 1. - С. 39-41.
5. Пушкар'ов О.В. Біоаккумуляція тритію у природно-техногенних системах [Текст] / О.В. Пушкар'ов, І.М. Севрук // *Геохімія техногенезу*. - 2023. № 37. - С. 20-25.
6. ДИРЕКТИВА РАДИ 2013/59/ЄВРАТОМ від 5 грудня

2013 року про встановлені основних норм безпеки для захисту від загроз, зумовлених впливом іонізуючого випромінювання, і скасування директив 89/618/Євратом, 90/641/Євратом, 96/29/Євратом, 97/43/Євратом і 2003/122/Євратом.

[https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984\\_006-13#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_006-13#Text).

7. UNSCEAR 2016. Reports to the General Assembly with Scientific Annexes. Biological effects of selected internal emitters. New York, 2016.

8. Report on the safety review of the alps-treated water at the fukushima daiichi nuclear power station. Report by the IAEA of the IAEA Review of Safety Related Aspects of Handling ALPS-Treated Water at TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station 2023. [https://www.iaea.org/sites/default/files/iaea\\_comprehensive\\_alps\\_report.pdf](https://www.iaea.org/sites/default/files/iaea_comprehensive_alps_report.pdf).

9. Коваленко Г. Д. Деякі питання моделювання розповсюдження тритію в ґрунтових водах [Текст] / Г. Д. Коваленко, В. В. Турбаєвський // Ядерні й радіаційні технології. – 2004. – Т. 4, № 3. – С. 46–52.

10. Priyanka J. Reddy. Application of portable liquid scintillation counter for on-field measurement of tritium in aqueous samples during radiation emergency [Text] / J. Reddy Priyanka, Sankhla Rajesh, Chaudhury Probal // Journal of Environmental Radioactivity. - 2024. - Volume 272. - P. 107330.

11. Про затвердження Норм радіаційної безпеки України (НРБУ-97). [Текст]. – Введ. 1997-07-04. – К. – МОЗУ, 1997. – 127 с.

12. Ліквідація радіаційної аварії на сховищах 19, 20 – реконструкція мережі спостережних свердловин та прогноз радіаційної обстановки. [Текст] : звіт про НД (заключний) / УкрНДІЕП – № 5.1-870. Х., 1999. – 78 с.

13. Створення мережі контролю за станом підземних вод та виконання прогнозних розрахунків щодо міграції тритію в довкіллі району розташування пункту захоронення радіоактивних відходів Харківського спецкомбінату. [Текст] : звіт про НДР / ХДМССРБОНС – № 53 від 19.08.02 р. Х., 2002. – 80 с.

14. Kartashov V.V. Tritium accumulation and preservation into clay minerals for environmental protection. [Text] / V.V.Kartashov, G.D.Kovalenko, A.N.Letuchi, V.P.Samodurov, V.L Vitko // Problems of atomic science and technology. – 2004. – №5, Series: Nuclear Physics Investigations(44). – P. 103-107.

15. Проведення геолого-розвідувальних робіт на території ПЗРВ для визначення розмірів забруднення тритієм зони аерації та підземних вод. Етап 3. Визначення розмірів забруднення тритієм зони аерації та підземних вод, прогнозні оцінки до 2016 р. [Текст] : звіт про НДР (заключний) / УкрНДІЕП. – Х., 2012. – 76 с.

## References

1. Pushkarov, O. V., & Sevruc, I. M. (2021). Study of tritium migration and retention mechanisms in the geological environment (by the example of the kyiv radioactive waste storage facility). *Geochemistry of Technogenesis*, 6(34), 45–57.
2. Kovalenko, O. V. (2015). Modeliuvannya mihratsii trytiiu v navkolyshnomu seredovyshchi. *Matematychnye modeliuvannya v ekonomitsi*, (2), 51-64.
3. Mathur-De Vre, R., & Binet, J. (1984). Molecular aspects of tritiated water and natural water in radiation biology. *Progress in biophysics and molecular biology*, 43(2), 161-193.
4. Pushkarov O.V., Pushkarova R.O., Yakovlyev Ye.O., Koltunov B.G., Prymachenko V.M.(2004). Atmoheomihratsiia trytiiu zi skhovyshch radioaktyvnykh vidkhodiv i yoho rozpodil u hruntovo-roslynному kompleksі Mineral resources of Ukraine, 1. 39-41.
5. Pushkarov, O. V., & Sevruc, I. M. (2023). BIOACCU-

MULATION OF TRITIUM IN NATURAL AND TECHNOLOGICAL SYSTEMS. *Neokhimiia tekhnohenezu*, (37), 20-25.

6. DYREKTYVA RADY 2013/59/IEVRATOM vid 5 hrudnia 2013 roku pro vstanovlenym osnovnykh norm bezpeky dlia zakhystu vid zahroz, zumovlenykh vplyvom ionizuiuchoho vyprominiuvannya, i skasuvannya dyrektyv 89/618/Ievratom, 90/641/Ievratom, 96/29/Ievratom, 97/43/Ievratom i 2003/122/Ievratom. [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984\\_006-13#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_006-13#Text).

7. UNSCEAR 2016. Reports to the General Assembly with Scientific Annexes. Biological effects of selected internal emitters. New York, 2016.

8. Report on the safety review of the alps-treated water at the fukushima daiichi nuclear power station. Report by the IAEA of the IAEA Review of Safety Related Aspects of Handling ALPS-Treated Water at TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station 2023. [https://www.iaea.org/sites/default/files/iaea\\_comprehensive\\_alps\\_report.pdf](https://www.iaea.org/sites/default/files/iaea_comprehensive_alps_report.pdf).

9. Kovalenko, H.D., Turbaievskiy, V.V. (2004). Deiaki pytannia modeliuvannya rozpovsiudzhennia trytiiu v gruntovykh vodakh [Some modeling distribution of tritium in groundwater]. *Yaderni y radiatsiini tekhnolohii – Nuclear and Radiation Technology*, vol. 4, no. 3, pp. 46–52.

10. Reddy, P. J., Sankhla, R., & Chaudhury, P. (2024). Application of portable liquid scintillation counter for on-field measurement of tritium in aqueous samples during radiation emergency. *Journal of Environmental Radioactivity*, 272, 107330.

11. Pro zatverdzhennia Norm radiatsiinoi bezpeky Ukrainy (NRBU-97). Vved. 1997-07-04. K. MOZU, 1997. 127 s.

12. Likvidatsiia radiatsiinoi avarii na skhovyshchakh 19, 20 – rekonstruktsiia merezhi spostereznykh sverdlovin ta prohnaz radiatsiinoi obstanovky. [Tekst] : zvit pro ND (zakliuchnyi) / UkrNDIEP № 5.1-870. Kh., 1999. 78 s.

13. Stvorennia merezhi kontroliu za stanom pidzemnykh vod ta vykonannia prohnaznykh rozrakhunkiv shchodo mihratsii trytiiu v dovkilli raionu roztashuvannya punktu zachoronennia radioaktyvnykh vidkhodiv Kharkivskoho spetskombinatu.: zvit pro NDR / KhDMSSRBONS № 53 vid 19.08.02 r. Kh., 2002. 80 s.

14. Kartashov, V. V., Kovalenko, G. D., Letuchi, A. N., Samodurov, V. P., & Vitko, V. I. (2004). Tritium accumulation and preservation into clay minerals for environmental protection. *Вопросы атомной науки и техники*.

15. Provedennia heoloho-rozviduvalnykh robіt na terytorii PZRV dlia vyznachennia rozmiriv zabrudnennia trytiiem zony aeratsii ta pidzemnykh vod. Etap 3. Vyznachennia rozmiriv zabrudnennia trytiiem zony aeratsii ta pidzemnykh vod, prohnazni otsinky do 2016 r. : zvit pro NDR (zakliuchnyi) / UkrNDIEP. – Kh., 2012. 76 s.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.Ф. Харченко, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна.

**Автор:** ВОРОБІЙОВ Олег Миколайович  
аспірант кафедри інженерної екології міст  
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова  
E-mail – [oleh.vorobiov@kname.edu.ua](mailto:oleh.vorobiov@kname.edu.ua)  
ID ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8712-0643>

**Автор:** ЮРЧЕНКО Валентина Олександрівна  
доктор технічних наук, професор, професор кафедри  
інженерної екології міст  
Харківський національний університет міського  
господарства імені О.М. Бекетова  
E-mail – [valentyyna.yurchenko@kname.edu.ua](mailto:valentyyna.yurchenko@kname.edu.ua)  
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7123-710X>

**Автор:** РЕШЕТЧЕНКО Альона Ігорівна  
кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерної  
екології міст  
Харківський національний університет міського  
господарства імені О.М. Бекетова  
E-mail – [alona.reshetchenko@kname.edu.ua](mailto:alona.reshetchenko@kname.edu.ua)  
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0767-8597>

## MONITORING OF GROUNDWATER CONTAMINATION WITH TRITIUM AFTER A RADIATION ACCIDENT AT A RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL SITE

O. Vorobiov, V. Yurchenko, A. Reshetchenko

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

*The article analyses the data of long-term monitoring of the level of tritium contamination of groundwater in the area of the radioactive waste disposal site. Tritium is a radioactive isotope of hydrogen, a soft beta emitter. The impressive effect of tritium is due to the biological significance of the molecules into which it incorporates. Radioactive waste storage facilities store a lot of tritium-rich radioactive waste of various origins, a potential tritium source entering the natural environment. Any tritium released appears as tritium water (water that contains tritium in its molecules). Nowadays, the problem of tritium contamination of water ecosystems in the radioactive waste storage facilities' areas can be considered one of the main issues in radioecology. The study aims to assess the level of safety of underground water in the radioactive waste disposal site area by the level of tritium content based on long-term monitoring data.*

*The object of the study was the content of tritium in the underground water of the first aquifer in the territory of the radioactive waste disposal site (strict regime zone, sanitary and protective zone, and in underground waters of wells outside and in surface water bodies of the natural environment). We tested the tritium activity in water samples using the Triathler 425-034 liquid scintillation radiometer.*

*In 1997, a radiation accident occurred at the radioactive waste disposal site. It led to the penetration of tritium into the first aquifer. Work has been underway to eliminate the accident. Modernisation of the system of wells for monitoring the underground water tritium contamination level also took place. As a result of the performed works, the radiation situation in the accident area has stabilised, and contamination of the aquifer due to the inflow of surface contaminated water from radioactive waste storage facilities has completely stopped.*

*The results of long-term monitoring of tritium content in water of boreholes and wells and natural objects (reservoirs) located outside the sanitary protection zone of the enterprise showed that 27 years after the radiation accident, the radiation situation in the studied area is stable. The total activity of tritium in the aquifer of the monitoring wells is decreasing and has now reached the regulatory level in all but three wells. The concentration of tritium in underground waters (wells) and surface waters (reservoirs) outside the sanitary and protective zone has never exceeded the environmentally safe level during the monitoring period. At present, 89% of the studied monitoring sites (boreholes, natural reservoirs, wells) have tritium content that is within the environmentally safe range.*

**Keywords:** radioactive waste disposal site, radiation accident, tritium, aquifers, monitoring, environmental safety.