ТРИТІЙ У ЯДЕРНІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ

Емлен Соботович
доктор геол.-мінер. наук,
академік НАН України,
директор Інституту геохімії
навколишнього середовища
НАН України, м. Київ

Олександр Бакай
доктор фіз.-мат. наук,
академік НАН України,
завідувач відділу Інституту
теоретичної фізики ННЦ "ХФТІ"
НАН України, м. Харків

Віктор Долін
доктор геол. наук
завідувач відділу біогеохімії
Інституту геохімії
навколишнього середовища
НАН України, м. Київ

Певно, жодному хімічному елементу (за винятком хіба що вуглецю) науковці не приділяють стільки уваги, скільки водню та його ізотопам. Це пов'язано не лише з винятковою геологічною і біологічною роллю води, але й з перспективами розвитку водневої, ядерної і термоядерної енергетики, оскільки водень та його ізотопи є як реагентами, так і продуктами ядерного поділу і синтезу.

Серед ізотопів водню тритій посідає особливе місце. З одного боку, він бере участь у всіх процесах колообігу і метаболізму води, а з іншого — цей ізотоп радіоактивний. Тритій — це м'який бета-випромінювач (середня енергія розпаду 5,7 кеВ) з періодом напіврозпаду 12,33 роки. Він є одним з найбільш поширених у природі серед легких радіоактивних ізотопів, Як і його стабільний аналог, він може легко мігрувати разом із повітряними та водними потоками, накопичуватися в складі мінеральних та органічних сполук. Потенційна небезпека тритію зумовлена тим, що він, як і стабільний ізотоп водню, утворює воду (надважку), а отже є радіоактивним будівельним матеріалом живих організмів.

Природний тритій утворюється у стратосфері під впливом космічного випромінювання. Швидкість утворення природного тритію, g_N, не змінюється з часом, а ймовірність того, що радіоактивне ядро проживе час t, визначається законом радіоактивного розпаду:

$$N=N_0 e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

де N_0 — вихідна (на час утворення), N — сучасна, що залишилася після розпаду протягом часу t, кількість радіоктивного ізотопу, $\lambda=ln2/T_{1/2}=0,0562/рік$, $T_{1/2}$ — період напіврозпаду тритію. При швидкості утворення тритію $g_N=6,2\cdot10^{16}$ Бк/рік (173 г/рік) постійна загальна його кількість підтримується на рівноважному рівні $G_N=1.3\cdot10^{16}$ Бк (3,6 кг). Тут ми подаємо облік кількості тритію у вагових одиницях та в одиницях радіоактивності Беккерелях (Бк). Надалі ж переважно використовуватимо одиниці радіоактивності. 1 Бк — це така кількість радіоактивної речовини, в якій протягом 1 секунди відбувається 1 акт розпаду: 1 Бк = 1 розпад/сек = $2,703\cdot10^{-11}$ Кі (Кюрі).

Окрім природних існують і техногенні джерела утворення тритію. Найпотужнішим джерелом техногенного тритію стали ядерні випробування минулого сторіччя (див. рис. 5). Унаслідок випробувань ядерної зброї вміст техногенного тритію в біосфері на початку 1950-х рр. сягнув природного рівня, а в середині 1960-х рр. уже перевищував його понад 100 разів. Унаслідок ядерних вибухів в атмосфері протягом 1945-1975 рр. утворилося близько $2,4\cdot10^{20}$ Бк тритію. Надалі вміст цього техногенного тритію поступово зменшувався завдяки радіоактивному розпаду і тому, що почав діяти міждержавний договір щодо обмеження ядерних випробувань, підписаний головними ядерними державами у 1963 р. Відтоді переважна частина "бомбового" тритію розпалася, а випробування ядерної зброї країнами, що не приєднались до цього договору, (останнє випробування проведено КНДР у 2009 р.) не настільки масштабні, щоб істотно погіршити тритієву загрозу.

Другим за потужністю техногенним джерелом донедавна вважали виробництво люмінофорів на основі тритію, що призвело до накопичення у біосфері на початок 1990-х років до $7,4\cdot10^{18}$ Бк. Наукові досягнення у галузі виробництва альтернативних джерел люмінесценції в останні два десятиріччя призвели до поступового зменшення цього джерела тритію.

Вміст тритію в біосфері, зумовлений генеруванням підприємствами ядерного паливного циклу, сягнув постійного природного рівня на початку 1980-х рр. Наразі внесок тритію від цього джерела майже зрівнявся з кількістю "бомбового" тритію й у недалекому майбутньому визначатиме його загальний вміст у біосфері. **Сучасний вміст тритію у біосфері становить $2{,}1 \cdot 10^{19}$ Бк, що майже в 20 разів перевищує його природний рівень.**

Звернемо увагу на те, що в загальній кількості техногенного тритію у довкіллі й досі *переважає та його частина, що утворилася внаслідок випробувань ядерної зброї*. Але ця частка тритію поступово зменшуватиметься. Натомість *надходження тритію від ядерних реакторів та підприємств ядерної енергетики збільшуватиметься внаслідок прогнозованого збільшення ядерного сектору глобальної енергетики*. Протягом найближчих десятиліть світовий сектор ядерної енергетики має зрости приблизно в чотири рази. За такого розвитку накопичення тритію в довкіллі збільшуватиметься, а отже загострюватиметься і проблема тритієвої безпеки та контролю.

Для оцінок інтенсивності викидів тритію в довкілля ядерними реакторами та підприємствами необхідно знати генераційні потужності цих джерел, як зупинених, так і тих, що працюють, а також тих реакторів, що будуть уведені в дію. Ці величини залежать від типу реактора та способу його експлуатації. Надалі ми розглянемо основні механізми утворення тритію в ядерних і термоядерних реакторах, надамо емпіричні дані щодо величин g_i. Це дає змогу одержати прогностичну оцінку накопичення тритію в довкіллі на наступні десятиріччя з урахуванням дії усіх техногенних джерел (див. рис. 5).

В Україні наразі діє 15 блоків АЕС та існує 6 регіональних сховищ радіоактивних відходів. Згідно зі затвердженою стратегією розвитку енергетики України число діючих ядерних реакторів має подвоїтись протягом двох наступних десятиліть. Через це проблема біогенної міграції тритію у трофічні ланцюги та надійної ізоляції тритієвих відходів стає для нашої країни актуальною. Нижче ми розглянемо стан тритієвої проблеми в Україні.

При написанні цієї статті широко використано монографічну літературу, нормативні акти та інші першоджерела. Їх зацікавлений читач може знайти в списках літератури небагатьох цитованих нижче публікацій [1-10].

Радіобіологічні характеристики та допустимі норми тритію в довкіллі

Саме випробування ядерної зброї викликали підвищений інтерес до тритію у біологів. Наслідком досліджень радіобіологічних властивостей тритію було введення нормування його вмісту у питній воді, атмосферному повітрі та продуктах харчування. Щоправда, у деяких ядерних країнах, зокрема Японії, Південній Кореї, Аргентині, Китаї, Індії вміст тритію в довкіллі ще й досі не нормується.

Механізми та наслідки впливу тритію на живі організми наразі викликають гостру полеміку серед фахівців при оцінюванні тритієвої загрози. У світовій науковій літературі, нормативних директивах та рекомендаціях, проаналізованих у монографії [4], оцінюють рівень безпечної концентрацій тритію. Унаслідок невеликого пробігу бета-частинки, що утворюється при розпаді тритію, вона нездатна подолати товщину шкіряного покриву людини, тож тритій не здійснює зовнішнього опромінювання. Його радіобіологічна небезпека пов'язана, передусім, зі споживанням і засвоєнням забрудненої тритієм води. Тому при розрахунку дози опромінювання від природних та техногенних джерел *"тритієвий чинник"* не враховують.

Численні експериментальні дані свідчать про дуже високу стійкість живих організмів до тритієвого забруднення середовища. Зокрема, миші та щури можуть споживати воду з концентрацією тритію до 8,000,000 Бк/л, без помітних змін морфології, функціональної здатності, росту, розвитку, тривалості життя їхнього організму.

Чи мають люди таку здатність, достеменно невідомо. Для них нормативи розраховують, виходячи з рівня референтної дози опромінювання, що встановлюється урядом країни, дозового коефіцієнта, що є характеристикою кожного нормованого радіоактивного ізотопу, та рівня споживання (для тритію передусім) води. Встановлено, що ризик летальних та важких нелетальних випадків захворювання від дози 0,1 мілі-Зіверт (мЗв) на рік становить 10^{-5}-10^{-4} на рік або близько $6 \cdot 10^{-4}$ протягом життя (~70 років).

Зіверт (Зв, Sv) — одиниця вимірювання еквівалентної дози іонізуючого випромінювання в системі СІ. Один зіверт дорівнює еквівалентній дозі будь-якого виду випромінювання, поглиненої одним кілограмом біологічної тканини, що створює такий самий біологічний ефект, як і поглинена доза в один грей рентгенівського або γ-випромінювань (Зв = Дж/кг. Одиниця названа на честь шведського медичного фізика *Рольфа Зіверта* за його дослідження біологічної дії радіації на живі істоти (1 Зв = 100 бер).

Використовуючи дозові коефіцієнти для тритію, встановлені ЄВРОАТОМом у 1996 р., розрахунковий допустимий рівень тритію у воді становить для дорослих 7610 Бк/л, для дітей віком до 1 року — 4280 Бк/л.

У 1998 р. фахівцями Агентства з захисту навколишнього середовища США розраховано дозові коефіцієнти для всіх відомих радіоактивних ізотопів, що визначають ризик захворювання на рак та летального наслідку[1]. Світова спільнота наразі прагне до виконання принципу нанесення щонайменшої шкоди здоров'ю унаслідок техногенної діяльності. Виходячи з принципу ALARA, концентрація тритію у питній воді має не перевищувати 21 Бк/л. Найближчий до цієї величини норматив, уведений в країнах Євросоюзу, за винятком Фінляндії (табл.1).

Ризик летального раку при споживанні протягом життя води з концентрацією тритію 100 Бк/л становить 5 випадків на 1 млн. населення. Нормативи, встановлені в Росії та Канаді, найбільше відповідають рекомендаціям Всесвітньої організації охорони здоров'я та ЄВРОАТОМу.

Таблиця 1.
Світові нормативи вмісту тритію у питній воді [2, 10]

Країна	Допустима концентрація, Бк/л
Країни ЄС	100
США	740
Канада	7 000
Росія	7 700
Швейцарія	10 000
Україна	30 000
Фінляндія	30 000
Австралія	76 103

[1] Принципи ALARA (As Low As Reasonably Achievable) — один із основних критеріїв, рекомендованих Міжнародною комісією з радіаційного захисту та CERCLA (Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act), які декларують мінімальний ризик раку внаслідок опромінювання (забруднення навколишнього середовища) — один випадок на мільйон населення.

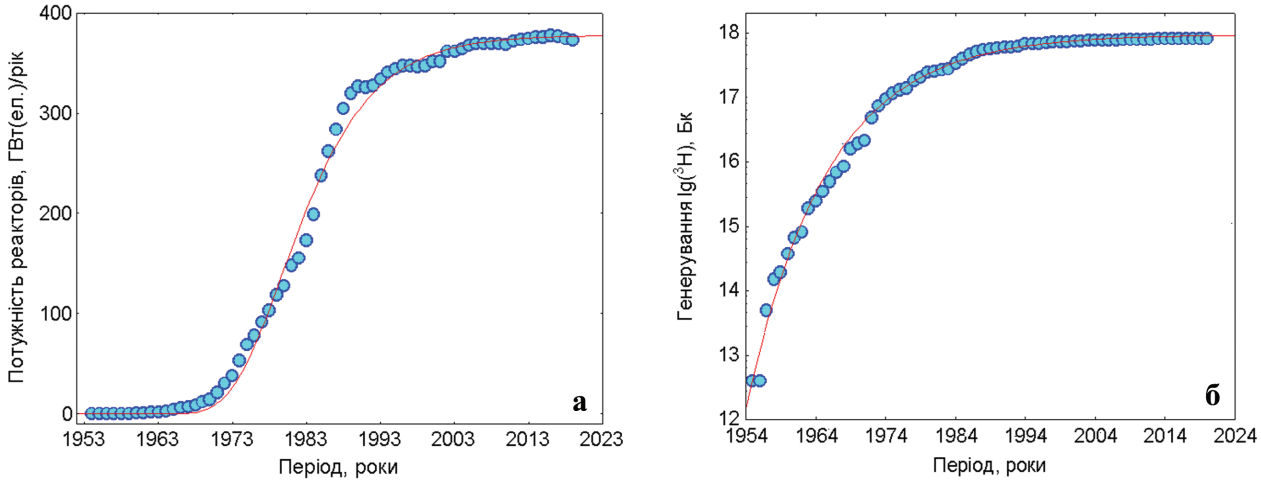


Рис. 1. а) Поступ розвитку ядерної енергетики світу від часу її освоєння
б) кількість тритію, яка щорічно генерується усіма ядерними реакторами в світі

Таблиця 2. Оцінка обсягів генерування тритію в ядерних реакторах, Бк/(МВт(ел.)·рік) [7]

Джерело	PWR	BWR	HWR	GCR
Реакції поділу	$7{,}5\cdot10^{11}$	$7{,}5\cdot10^{11}$	$5{,}5\cdot10^{11}$	$7{,}5\cdot10^{11}$
Активація:				
— дейтерію	$4{,}0\cdot10^{7}$	$4{,}0\cdot10^{7}$	$2{,}0\cdot10^{13}$	
— літію	$7{,}0.10^{8}$			$2{,}0\cdot10^{10}$
— бору	$2{,}6\cdot10^{10}$	$3{,}0\cdot10^{11}$		
Всього	$\mathbf{8{,}0\cdot10^{11}}$	$\mathbf{1{,}1\cdot10^{12}}$	$\mathbf{2{,}0\cdot10^{13}}$	$\mathbf{8{,}0\cdot10^{11}}$

Норматив, встановлений в Україні та Фінляндії (у 300 разів вищий за рекомендований Євросоюзом), визначає ризик виникнення 2100 випадків захворювання раком на 1 млн. населення протягом життя, майже 1500 із яких — летальні. Фактична ж концентрація тритію у питній воді більшості джерел водопостачання України є досить низькою, вона не перевищує 10-15 Бк/л, що зумовлює порівняно низький ризик — менше 1 летального випадку раку на 1 млн. населення протягом життя.

Значна розбіжність (понад 750 разів) встановлених у різних країнах нормативів допустимого вмісту тритію у воді свідчить про недостатньо глибоке вивчення проблеми його радіобіологічного впливу та відносно невеликий рівень тритієвої загрози за наявних середніх концентрацій у довкіллі.

Оскільки наразі тритій далеко не єдина і не головна екологічна загроза, наведемо для порівняння дані щодо деяких інших екологічних ризиків[2]. *Щорічно 8000 українців захворюють на рак легенів від опромінювання радоном*, що відповідає ризику $1{,}6\cdot10^{-4}$ на рік або $1\cdot10^{-2}$ протягом життя. *Серед смертельних ризиків техногенної діяльності в Україні провідне місце займає вугільна промисловість (за рік гине до 20 000 з 1 млн. робітників цієї галузі)*. У США ця величина становить 1000. Друге місце у нас посідають *нещасні випадки на автотранспорті* (115-210). *Летальні ризики для персоналу АЕС, який безпосередньо працює з джерелами іонізуючого випромінювання (категорія А), становлять 70, населення зони впливу теплоелектростанцій — 30, мешканці зон впливу підприємств ядерного паливного комплексу України (гірничодобувних, переробних підприємств, АЕС) — 0,2 за рік на 1 млн. населення*.

Тож тритієва проблема наразі не є нагальною для України. Проте, невизначеність радіобіологічного впливу тритію у поєднанні з перспективами розвитку ядерної енергетики та позапроектним терміном експлуатації приповерхневих сховищ радіоактивних відходів, що веде до тритієвого забруднення довкілля, визначає зростання її актуальності у найближчому майбутньому.

Утворення тритію в ядерних реакторах

При роботі АЕС тритій утворюється в реакторах у результаті ядерних перетворень і може перебувати у сполуках HTO, DTO, HT, T_2, тритідів металів та органічних похідних.

Основним процесом утворення тритію в реакторі є потрійний поділ ядер палива. У процесі поділу ядро урану зазвичай розпадається на два приблизно рівні уламки та декілька нейтронів. На кожні 10 000 поділів ядро одноразово ділиться на три частини (потрійний поділ), одна з яких може бути ядром тритію. При виробництві на АЕС 1 МВт електроенергії (МВт (ел.)) відбувається приблизно 10^{17} поділів на секунду. При цьому утворюється близько 10^{13} атомів ^3H, що становить радіоактивність $6{,}75\cdot10^{11}$ Бк/(МВт(ел.)·рік). При опроміненні ядер плутонію в активній зоні ядерних реакторів реакція виходу тритію втричі ефективніша, ніж при опроміненні урану. Понад 96% тритію в реакторному паливі легководних реакторів утворюється внаслідок потрійного поділу.

(n, γ) — реакції на ядрах дейтерію, який перебуває в теплоносії (воді). У водяних реакторах тритій утворюється також шляхом перетворення дейтерію, присутнього у воді теплоносія і сповільнювача, завдяки реакції захоплення дейтерієм нейтрона: $D+n\rightarrow T+\gamma$. Тут буквами *n* і γ позначено нейтрон і високоенергетичний квант електромагнітного поля. У легководному реакторі ця реакція протікає завдяки наявності невеликого вмісту дейтерію в природній воді, де $D_2O{:}H_2O = 1{,}5\cdot10^{-4}$. Через низьку ймовірність захоплення дейтерієм нейтрона, це джерело утворення тритію є незначним. Навпаки, у важководних реакторах, де D_2O використовується і як сповільнювач, і як теплоносій, ця реакція є основним джерелом тритію (табл. 2).

[2]Тут використано матеріали доповіді *Ю.М. Скалецького* "Проблеми державної політики з ліквідації наслідків аварії на Чорнобильській АЕС" (Національний інститут стратегічних досліджень, грудень 2010 р.).

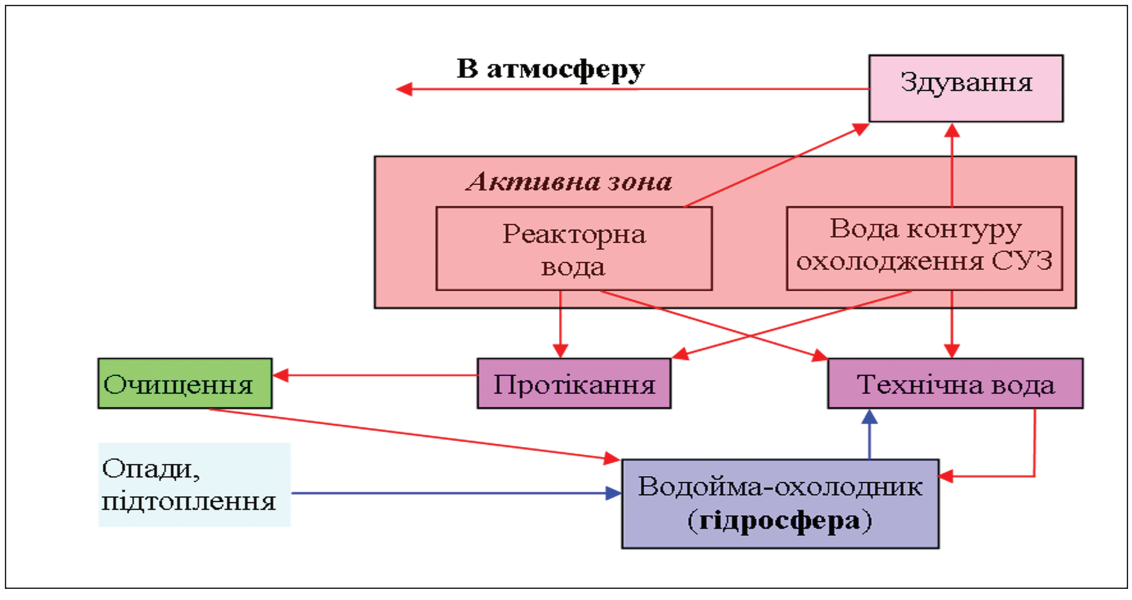


Рис. 2. Структурна схема шляхів переносення тритію на АЕС і його витоків у довкілля (СУЗ — система управління і захисту реактора)

У легководних ректорах тритій утворюється також унаслідок трансмутації інших легких ізотопів, наприклад бору і літію, які входять до складу водних теплоносіїв та стрижнів регулювання. Існують й інші ланцюжки ядерних перетворень, при яких утворюється тритій, але їхній внесок у загальну кількість тритію незначний.

У табл. 2 наведено оцінки загальної кількості напрацювання тритію в ядерних реакторах з розрахунку на одиницю потужності 1 Мвт за один рік, тобто величини коефіцієнтів g_i, які визначають генерування тритію реактором, поділені на енергетичну потужність ректора. Графічне зображення історії нарощування енергетичних потужностей світової ядерної енергетики наведено на рис. 1а. Знаючи типи реакторів, що вводились у дію, потужності та терміни їх експлуатації, за допомогою табл. 2 можна розрахувати динаміку реакторного генерування тритію. Швидкість генерування реакторного тритію показано на Рис. 1 б.

Як бачимо, сучасне напрацювання тритію в ядерних реакторах за рік приблизно дорівнює кількості природного тритію в біосфері. Використовуючи базу даних Всесвітньої ядерної асоціації станом на 01.12.2010 та оцінки, наведені в табл. 2, ми розрахували, що протягом 1954-2010 рр. у ядерних реакторах світу згенеровано $2{,}1 \cdot 10^{19}$ Бк тритію, що на порядок менше, ніж утворилося внаслідок ядерних випробувань до 1963 р. Сучасне щорічне утворення тритію в ядерних реакторах майже зрівнялося з постійним природним рівнем у біосфері. Насичення потужності цього джерела, що його видно на Рис. 1б — це тимчасове явище. Воно зумовлене сповільненням обсягу введення в дію нових потужностей ядерної енергетики. Зауважимо, що до 2050 р. вона має зрости у кілька разів.

Істотного розширення ядерного енергетичного сектору вимагає насамперед необхідність запобігання глобальній екологічній катастрофі, яку може спричинити надмірне спалювання вуглецю і вуглеводнів у тепловій енергетиці та транспортних засобах. Крім того, за прогнозами Римського Клубу вичерпання запасів органічного палива (газу, нафти) на нашій планеті очікується вже до середини нинішнього сторіччя. Альтернативні види енергії поки що нездатні забезпечити зростання енергетичних потреб.

Подальший розвиток ядерної галузі може відбуватися лише завдяки істотному прогресові ядерних технологій, шляхом уведення в експлуатацію реакторів IV покоління. Реактори нового покоління мають забезпечити підвищену надійність, безпеку експлуатації та перехід до використання як палива урану-238 та торію через вичерпування ізотопу уран-235, кількість якого становить лише 0,72% в природному урані.

Потужність генерування тритію та радіотоксичних актинідів в реакторах наступного покоління відрізнятиметься (можливо, відчутно) від тієї, що маємо наразі в реакторах поточного покоління. Розгляд цього питання є передчасним, доки не буде впроваджено бодай пілотні реактори IV покоління.

Емісія тритію з ядерних реакторів у навколишнє середовище

Екологічну небезпеку становить лише та частина (вважають, що близько половини згенерованого в реакторах тритію), яка потрапляє в довкілля. Ця величина істотно залежить від рівня ядерних технологій, засобів захисту від витоків тритію. Наразі саме на проблему витоків звертають не дуже велику увагу через порівняно невелику радіобіологічну загрозу тритію, але з часом ситуація може значно погіршитись і вимагатиме додаткових зусиль з упровадження ефективніших систем тритієвого захисту. Розглянемо детально шляхи потрапляння тритію з реакторів у довкілля.

Витік тритію в довкілля в процесі експлуатації АЕС відбувається внаслідок рідких скидів та газових викидів при протіканнях теплоносія, а також при здуванні з ємностей з теплоносієм. Основні шляхи потрапляння тритію в довкілля показано на рис. 2.

Газоподібні відходи викидаються в атмосферу через вентиляційні труби заввишки 100-150 м. Рідкі радіоактивні відходи (РРВ) піддають очищенню, після якого воду використовують повторно. Скидають тільки очищені дебалансні води, тобто ті, що витікають і накопичуються при переповнюванні ємностей для зберігання очищених вод. Питома активність дебалансних вод, що скидаються, зазвичай мала. Вона не перевищує допустимої активності питної води. Проте тритій при очищенні дебалансних вод на АЕС з води не видаляється. Викид тритію в газовій формі з легководних реакторів не перевищує 1% від загальної емісії. Переважна

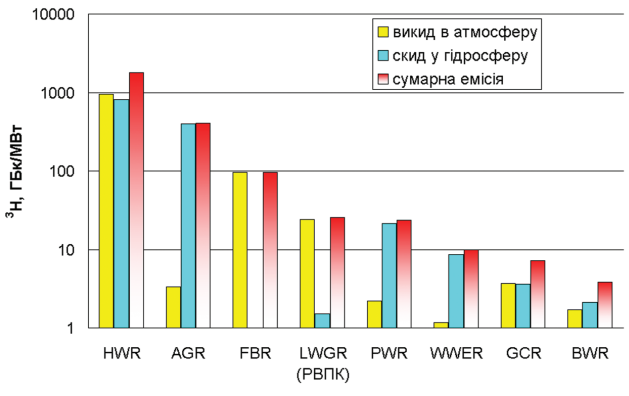


Рис. 3. Обсяги питомої емісії тритію з ядерних реакторів різних типів: HWR — важководний, AGR — удосконалений реактор з газовим охолодженням, FBR — реактор на швидких нейтронах, LWGR — легководний графітовий реактор, аналог — РВПК — реактор великої потужності канальний, PWR — легководний реактор під тиском, WWER (ВВЕР) — водо-водяний енергетичний реактор, GCR — реактор з газовим охолодженням, BWR — киплячий водяний реактор

частина тритію надходить у довкілля у вигляді рідких скидів. Загальну емісію тритію АЕС у світі в 1980 році оцінювали у $4 \cdot 10^{15}$ Бк. Розрахована за даними роботи [9] сумарна емісія тритію за 5 років протягом 1998-2002 рр. становила $5{,}1 \cdot 10^{16}$ Бк, у тому числі викиди в атмосферу — $1{,}3 \cdot 10^{16}$ Бк, скиди в гідросферу — $3{,}8 \cdot 10^{16}$ Бк.

Чільне місце за викидами в атмосферу посідають важководні реактори (декларовані викиди у 2000 р. становили понад $3 \cdot 10^{15}$ Бк). За скидами у гідросферу провідну позицію обіймають легководні реактори з борним регулюванням PWR/ВВЕР (до $3 \cdot 10^{15}$ Бк/рік і вище), скиди з газографітових (GCR) і важководних (HWR) реакторів перебувають на рівні $(2\text{-}2{,}5) \cdot 10^{15}$ Бк/рік.

На основі фактичних даних щодо викидів і скидів тритію АЕС світу та обсягом виробленої ними електроенергії нами розраховано середню питому емісію тритію з легководних, важководних та газографітових реакторів (рис. 3) [4]. Зауважимо, що розкид цих величин, який визначається особливостями експлуатації реактора, є досить великим.

Як бачимо, за величиною питомої емісії тритію провідна позиція належить важководним і газографітовим реакторам, а мінімальні питомі викиди в навколишнє середовище надходять із киплячих легководних реакторів BWR.

На підставі наведених оцінок можна розрахувати розподіл викидів тритію по країнах світу, виходячи з кількості та типу наявних там реакторів (рис. 4). Розраховані сучасні річні викиди тритію в атмосферу з ядерних реакторів можуть досягати $4{,}2 \cdot 10^{16}$ Бк/рік, скиди в гідросферу — $6{,}0 \cdot 10^{16}$, а сумарна емісія — $1{,}0 \cdot 10^{17}$, що майже вдвічі перевищує його утворення з природних джерел. Лідерами тритієвої емісії в навколишнє середовище виступають Індія, Південна Корея і Канада, які забезпечують 70% світової емісії тритію з ядерних реакторів (рис. 4). Водночас емісія з реакторів США, Франції і Японії, які забезпечують 56% виробництва світової електроенергії на АЕС, становить менше 10%. Понад 80% надходження тритію у навколишнє середовище забезпечують важководні реактори, частка яких у загальній потужності АЕС світу становить 6%. Протягом кампанії у навколишнє середовище надходить понад 13% тритію, що генерується в ядерних реакторах світу. На цей час у стадії будівництва перебувають 57 ядерних реакторів загальною потужністю 54,1 ГВт. Уведення нових потужностей в експлуатацію (з урахуванням тих, що буде виведено) може призвести до щорічного збільшення генерування тритію на $6{,}6 \cdot 10^{16}$ Бк, а його емісії з ядерних реакторів у навколишнє середовище — на $1{,}35 \cdot 10^{16}$ Бк (на 13,5%), в тому числі $5{,}8 \cdot 10^{15}$ Бк (на 13,8%) — викиди в атмосферу, $7{,}7 \cdot 10^{15}$ Бк (на 12,8%) — скиди у гідросферу. Для реакторів, що будуються, понад 65% прогнозованої емісії тритію забезпечуватимуть три важководні, сумарна потужність яких становить не більше 2% від загальної.

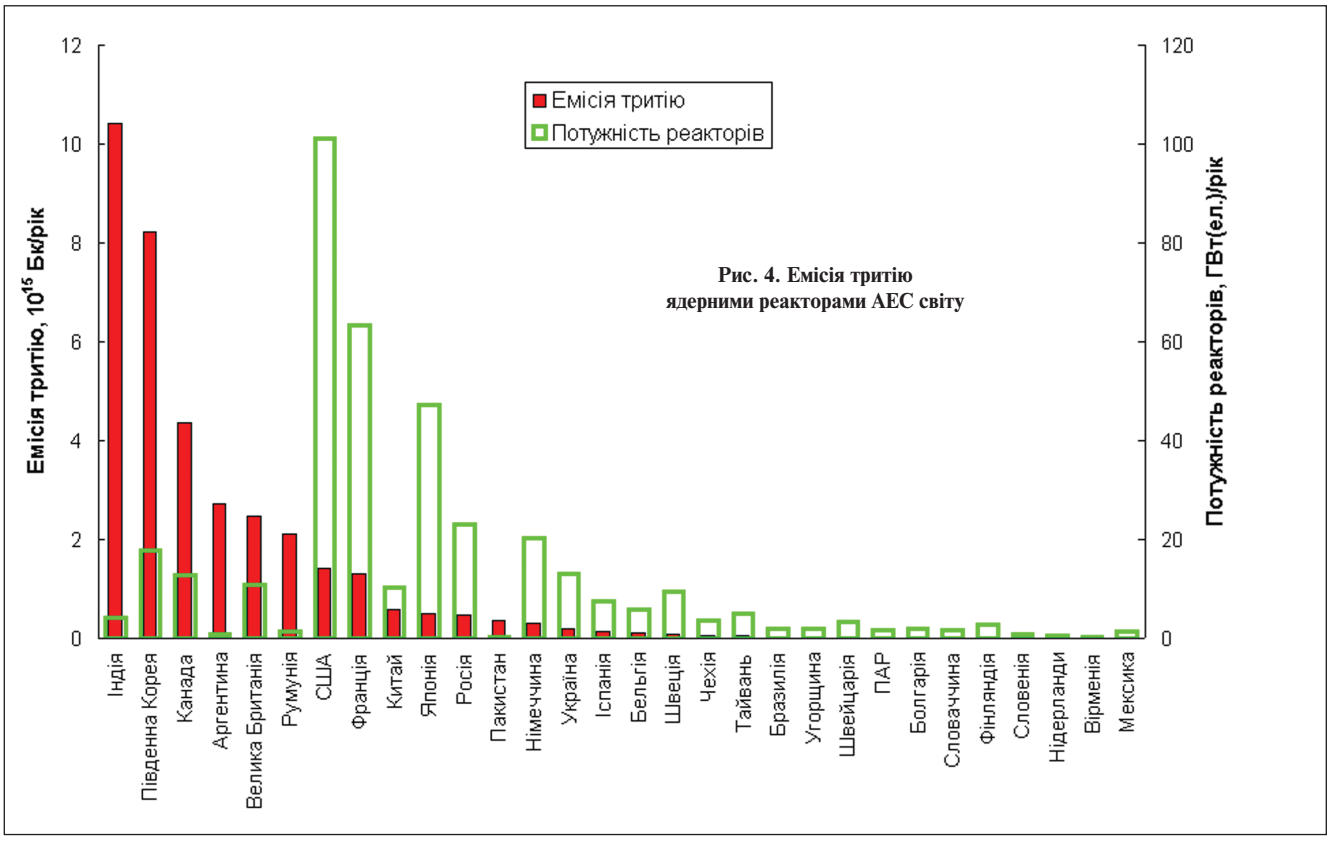


Рис. 4. Емісія тритію ядерними реакторами АЕС світу

Тритій на об'єктах перероблення відпрацьованого ядерного палива

У ядерній енергетиці головне джерело надходження тритію в навколишнє середовище пов'язане з переробленням відпрацьованого палива. Ці підприємства викидають в атмосферу 25% тритію в газовій фазі і 75% — у формі НТО. Переробний завод продуктивністю 1500 т UO_2 на рік, що відповідає встановленій потужності легководних реакторів 50 Гвт, викидає в атмосферу $(1\text{-}3)\cdot10^{16}$ Бк тритію в рік.

У процесі діяльності підприємств з перероблення відпрацьованого ядерного палива тритій викидається як у вигляді газо-аерозольних викидів, так і у вигляді рідких скидів відповідно в атмосферу і поверхневі та підземні води, збільшуючи рівні вмісту цього нукліда в навколишньому середовищі. Внаслідок фактичних і прогнозованих обсягів викиду, які становлять небезпеку для населення, були закриті дослідно-промислові установки в Карлсруе (Німеччина) і Вест-Веллі (США).

Використання води та азотної кислоти в процесі перероблення призводить до утворення великих об'ємів тритієвих стоків, близько 100 м³/т. На заводах, розташованих поблизу морського узбережжя, ці стоки скидають безпосередньо в море. В Індії тритієву воду випаровують на сонці, в Російській Федерації — зберігають тривалий час у відкритих водоймах [8].

Кількість тритію, який викинули в навколишнє середовище заводи Франції (La Hague і Marcoule) та Великої Британії (Windscale) у 1978 р., становила $2\cdot10^{15}$ Бк. Річні викиди тритію заводу Savannah River в Південній Каролині (США) протягом 1974-1978 рр. оцінювали в межах $(1{,}4\text{-}9{,}9)\cdot10^{16}$ Бк, в середньому — $4{,}1\cdot10^{16}$ Бк. Остання цифра відповідає щорічному надходженню тритію в біосферу з природних джерел. Аварійне скидання тритію заводом Північної Швейцарії в каналізаційну систему призвело до надходження $2\cdot10^{13}$ Бк ^{3}H в р. Глатт.

До теперішнього часу з 290 тис. т відпрацьованого ядерного палива близько 90 тис. т — перероблено. При переробленні таких обсягів у навколишнє середовище повинно надійти $(0{,}8\text{-}5{,}9)\cdot10^{18}$ Бк тритію, що відповідає його загальному вмісту в біосфері, який утворився з природних джерел. Сучасні потужності дають змогу переробляти 5550 т відпрацьованого ядерного палива (табл. 3), фактично переробляють близько 4000 т/рік. При переробленні такої кількості викид тритію в навколишнє середовище становить $(0{,}4\text{-}2{,}6)\cdot10^{17}$ Бк/рік, що вдвічі перевищує емісію тритію з ядерних реакторів.

Таблиця 3. Світові потужності з перероблення відпрацьованого ядерного палива, т/рік

Паливо легководних реакторів	Франція, La Hague	1700
	Велика Британія, Sellafield (THORP)	900
	Росія, Озерськ (Маяк)	400
	Японія (Rokkasho)	800
	Усього (оціночно)	3800
Паливо інших реакторів	Велика Британія, Sellafield (Magnox)	1500
	Індія	275
	Усього (оціночно)	**1750**
Сумарна потужність		**5550**

У найближчі 20 років у світі очікують напрацювання близько 400 000 т відпрацьованого ядерного палива, включаючи 60 000 т у Північній Америці та 69 000 т у Європі. При збереженні сучасних технологій очікуваний викид тритію при переробленні цих обсягів становитиме $3\cdot10^{19}$ Бк, що більше за сучасний вміст у біосфері, сформований разом із природних і техногенних джерел.

Таким чином, сучасні рівні надходження тритію в навколишнє середовище від підприємств ядерної енергетики протягом кампанії ядерних реакторів та у процесі перероблення відпрацьованого ядерного палива сягають $3{,}6\cdot10^{17}$ Бк, що в 6 разів перевищує його утворення з природних джерел та становить близько 50% від кількості, що генерується в ядерних реакторах. Викликає занепокоєння недосконалість заходів щодо уникнення тритієвої небезпеки при переробленні відпрацьованого ядерного палива. На думку деяких авторів, сучасні технології перероблення зумовлюють надходження в навколишнє середовище практично всієї тієї кількості тритію, що міститься у відпрацьованому ядерному паливі.

Викиди тритію внаслідок великих реакторних аварій

Ядерні аварії в Три-Майл Айленд (1979), Чорнобилі (1986) та у Фукусімі (2011) показали, що проблема безпеки та надійності реакторів залишається ключовою в ядерній енергетиці. Відсутність адекватної альтернативної енергетики, принаймні в поточному сторіччі, не дозволяє сповільнити темпи нарощування обсягів ядерної енергетики, але очевидно, що рівень її надійності та безпеки має бути істотно підвищеним за рахунок конструкційних удосконалень та впровадження високих технологій.

Порівняно з викидами інших високоактивних радіоізотопів при цих аваріях тритій становив невелику, хоч і не нехтовно малу екологічну небезпеку. Результати розрахунку викидів тритію при руйнації 4 енергоблоку ЧАЕС наведено нижче у розділі "Тритій в Україні". За приблизною оцінкою на чотирьох аварійних енергоблоках Фукусіми-1 було згенеровано близько $1\cdot10^{16}$ Бк тритію (з урахуванням відпрацьованого ядерного палива, яке зберігалося у басейнах витримки всередині енергоблоків). Можна припустити, що не менше половини цієї кількості викинуто в атмосферу з водяною парою унаслідок випаровування води при контакті з перегрітими, ймовірно, розплавленими паливними масами. Для порівняння: це вдвічі більше, ніж наразі зберігається у приповерхневих сховищах Київського міжобласного спецкомбінату в Пирогові. Через те, що це сховище розташовано в межах Київського мегаполісу, унаслідок недосконалого контролю та заходів щодо запобіганню тритієвого забруднення водоносних горизонтів, Пирогівський тритій може становити загрозу довкіллю нашої столиці. Зважаючи на значну потужність та безконтрольний стан цього джерела тритієвого забруднення, його слід прирівняти до великих аварійних. Істотні витоки тритію з приповерхневих сховищ радіоактивних відходів спостерігаються також на Харківському ДМСК в Україні, на сховищах Латвії, Угорщини, Франції, США, Канади та інших країн.

Еволюція глобального вмісту тритію в довкіллі

Вище описано природні та найістотніші техногенні джерела надходження тритію в довкілля. Надходження тритію від випробувань ядерної зброї та люмінофорної промисловості залишились у минулому і зараз накопичений від цих джерел тритій розпадається згідно з законом (1). Кількість цього тритію неважко підрахувати. Вочевидь

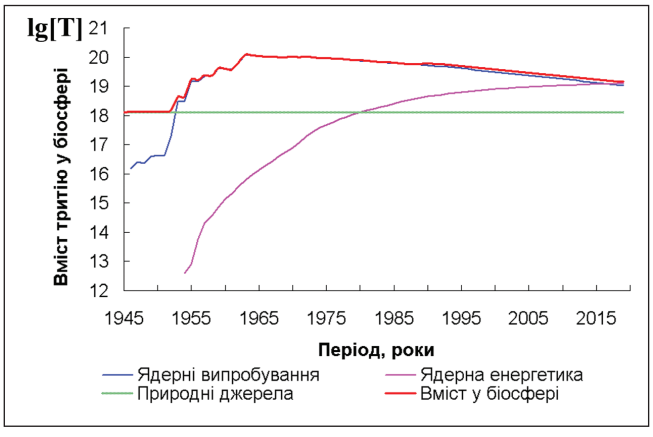


Рис. 5. Еволюція глобального вмісту тритію в довкіллі. Показано складники, що надійшли з різних джерел

Таблиця 4. Еволюція надходження та вмісту тритію в біосфері впродовж найближчих десятиліть

Джерело	Обсяг, Бк		
	01.01.1991	01.01.2011	01.01.2021
Природні: — постійно підтримуваний рівень, Бк — щорічне утворення, Бк	1,3·10^{18} 6,2 10^{16}	1,3·10^{18} 6,2 10^{16}	1,3·10^{18} 6,2 10^{16}
Ядерні випробування 1954-1962 рр., Бк	5,2·10^{19}	1,6·10^{19}	9,1·10^{18}
Виробництво люмінофорів, Бк	7,4·10^{18}	2,3·10^{18}	1,3·10^{18}
Підприємства ядерного паливного циклу			
Генерування в ядерних реакторах, Бк	4,2·10^{18}	9,6·10^{18}	1,1·10^{19}
Емісія в навколишнє середовище, Бк, в т.ч.:	4,0·10^{17}	4,6·10^{18}	5,2·10^{18}
— з ядерних реакторів протягом кампанії, Бк		1,3·10^{18}	1,5·10^{18}
— із заводів з перероблення ЯП, Бк		3,2·10^{18}	3,8·10^{18}
Разом у біосфері, Бк	**6,5·10^{19}**	2,9·10^{19}	2,3·10^{19}
Співвідношення ^{3}H з техногенних та природних джерел, разів	50,0	22,5	17,5
Внесок ядерного паливного циклу, %	6,5	32,9	48,5

ядерна (а в разі вступу в дію — і термоядерна) енергетика на довгий час стане постійно діючим техногенним джерелом тритію. Оскільки введення в дію нових потужностей атомної енергетики є справою порівняно повільною і заздалегідь плановану, включно з типами та потужностями реакторів, то можемо оцінити еволюцію глобального вмісту тритію в довкіллі не лише за попередні роки, але і спрогнозувати на наступне десятиріччя. Результати наших розрахунків подано на рис. 5. Оскільки навіть дослідницькі термоядерні реактори поки що не введені в дію, ми не враховували їх при прогностичному оцінюванні. Проте нижче окремим розділом розглянуто процеси та обсяги генерування тритію в термоядерних реакторах.

Для зручності наведемо в табл. 4 підсумкові числові дані щодо еволюції тритієвого вмісту в довкіллі протягом ближчих десятиліть та порівняння його надходження з різних джерел. Можна дійти висновку, що сучасний вміст тритію у біосфері вдвічі нижчий, ніж у 1990 р., та надалі знижуватиметься протягом найближчого десятиліття внаслідок радіоактивного розпаду "глобального" тритію. Перевищення "техногенного" тритію над "природним" у 1990 р. становило 50 разів, сучасне — 22,5, у 2020 р. воно становитиме 17,5 разів. При цьому внесок ядерного паливного циклу зріс від 6,5 до 33%, а до 2020 р. — перевищуватиме внесок інших техногенних джерел та становитиме 48,5% загального біосферного запасу тритію.

Тритій у термоядерній енергетиці

Термоядерна енергетика, судячи з темпів її створення, ще не скоро складе конкуренцію іншим, уже освоєним складникам світової енергетики. Проте ми вже сьогодні можемо оцінити рівень темпів надходження тритію в довкілля при застосуванні термоядерних реакторів.

Термоядерні реактори першого покоління (ймовірно, ними стануть реактори, створені на основі плазмових пасток типу ТОКАМАК і СТЕЛЛАРАТОР), працюватимуть на суміші дейтерію і тритію. Отже, тут тритій виступає в ролі термоядерного палива і обсяги його використання та, відповідно, витоків у довкілля (в розрахунку на одиницю виробленої електроенергії) будуть істотно більшими, ніж у сучасних ядерних реакторах.

Джерелом дейтерію є звичайна вода. В ній міститься приблизно 0,015% важкої води D_2O. При дейтерій-тритієвій реакції синтезу утворюється ядро гелію і високоенергетичний нейтрон:

$$D + T \rightarrow {}^4_2He + {}^1_0n + 17{,}6\ МеВ \qquad (2)$$

Для стабільної роботи термоядерного реактора передбачено відтворення тритію шляхом ядерних перетворень. З цією метою робоча зона реактора може бути оточена шаром літію (бланкетом, рис. 6), в якому будуть проходити реакції:

$$^6_3Li + {}^1_0n \rightarrow T + {}^4_2He + 4{,}8\ МеВ; \qquad (3)$$

$$^7_3Li + {}^1_0n \rightarrow T + {}^4_2He + {}^1_0n - 2{,}47\ МеВ. \qquad (4)$$

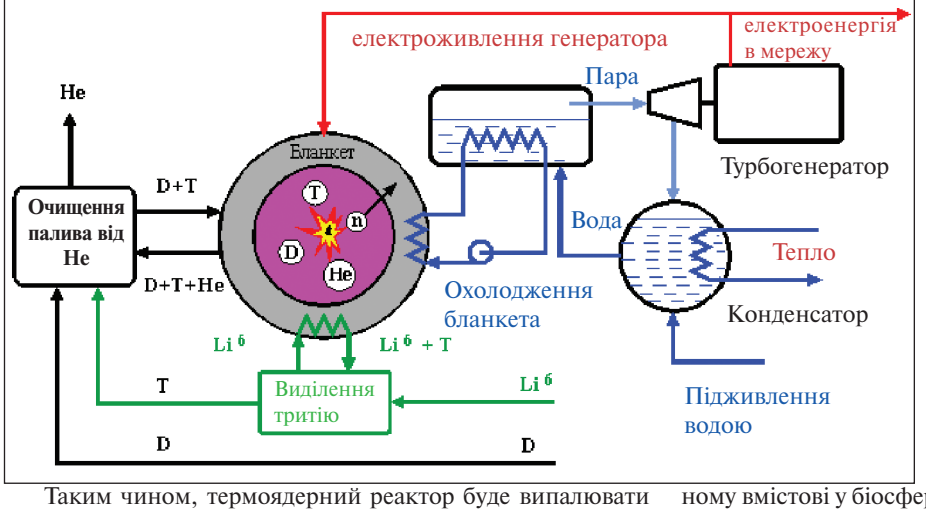
Природний літій містить обидва ізотопи у співвідношенні ^{6}Li : ^{7}Li = 7,5 : 92,5. Реакція з ^{6}Li є екзотермічною, що забезпечує отримання додаткової енергії в реакторі. Реакція з ^{7}Li є ендотермічною, зате відбувається без поглинання нейтронів а отже корисна для підтримування нейтронного балансу. Крім того, додаючи в бланкет берилій, можна регулювати нейтронний баланс шляхом розмноження нейтронів у реакціях

$$^9_4Be + {}^1_0n = 2\,{}^4_2He + 2\,{}^1_0n. \qquad (5)$$

Коефіцієнт відтворення тритію в бланкеті сягає 1,1.

Існують й інші схеми відтворення тритію з використанням літію, наприклад, застосовуючи рідкометалічний літій як теплоносій першого контуру.

Рис. 6. Схема основних технологічних контурів термоядерного реактора, який працюватиме на суміші дейтерію (D) та тритію (T)



Таким чином, термоядерний реактор буде випалювати дейтерій і літій, а в результаті основним продуктом ядерних реакцій буде інертний газ гелій. Термоядерний реактор споживатиме дуже невелику за вагою кількість літію та дейтерію. Наприклад, реактор з електричною потужністю 1 ГВт буде спалювати близько 100 кг дейтерію і 300 кг літію на рік. Якщо припустити, що всі термоядерні електростанції будуть виробляти $5 \cdot 10^{20}$ Дж на рік, тобто половину майбутніх потреб електроенергії, то загальне річне споживання дейтерію та літію складе лише 1 500 і 4 500 т відповідно. За такого споживання дейтерію, що міститься в природних водах (0,015%), вистачить на те, щоб забезпечувати людство енергією протягом багатьох мільйонів років.

Використання термоядерного DT-циклу згодом може обмежуватись наявними запасами літію. Його розвідані рудні запаси становлять $(8 - 10) \cdot 10^6$ т. Цього вистачить на багато сотень років. Крім того, літій міститься в морській воді з середньою концентрацією $1{,}7 \cdot 10^{-7}$ г/г і загальною кількістю, яка перевищує приблизно в 1000 разів розвідані рудні запаси. Але існують й інші ланцюжки термоядерних реакцій, які можна відтворювати в реакторах. Наприклад, перспективною є DD-реакція ядерного синтезу. З її освоєнням термоядерна енергетика матиме фактично необмежені енергетичні ресурси.

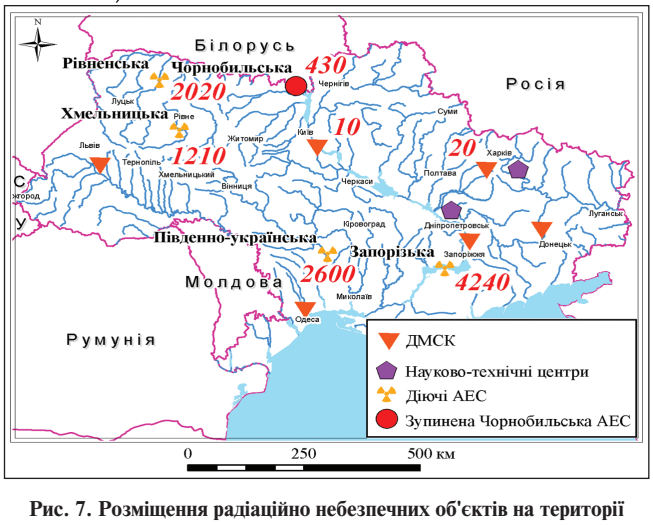


Рис. 7. Розміщення радіаційно небезпечних об'єктів на території України: 1 — атомні електростанції; 2 — науково-технічні центри; 3 — міжобласні спецкомбінати зі зберігання радіоактивних відходів; 4 — Чорнобильська зона відчуження; цифрами позначено сумарну тритієву емісію за період експлуатації АЕС та МСК з урахуванням розпаду станом на 01.01.2011 р. у ТБк — терабеккерелях: 1 ТБк =1 10^{12} Бк.

Оцінки показують, що витрати на виробництво палива для термоядерної енергетики становлять невелику частку вартості виробленої енергії.

Головними системами термоядерного реактора, в яких утворюється тритій, є: системи інжекції, збору та очищення тритію, бланкет-розмножувач та система екстракції тритію з бланкета. Загальний вміст тритію в термоядерному реакторі становитиме 8-19 кг на 1 ГВт, або $(3\text{-}7) \cdot 10^{18}$ Бк, а величина гранично допустимого викиду в атмосферу — $(0{,}4\text{-}40) \cdot 10^{12}$ Бк/добу. Назагал, генерування тритію в термоядерному реакторі оцінюють у $9{,}3 \cdot 10^{18}$ Бк/ГВт, що приблизно дорівнює його сучасному вмістові у біосфері з природних і техногенних джерел. Викид тритію на одиницю потужності з термоядерної станції в довкілля буде в 10 000 разів більшим, ніж у сучасних ядерних реакторах і становитиме від $(1{,}7\text{-}130) \cdot 10^{13}$ Бк/рік. У цих же межах оцінюють очікувані втрати тритію при захороненні відходів у глибоких геологічних формаціях. Таким чином, середньорічна емісія тритію в біосферу в процесі експлуатації термоядерного реактора може бути оцінена у $(1\text{-}3) \cdot 10^{14}$ Бк/ГВт(ел.).

Виходячи з наведених оцінок, бачимо, що переорієнтування енергетичного комплексу на керований термоядерний синтез на рівні сучасних обсягів виробництва електроенергії (близько 15 000 ГВт·год/рік) призведе до щорічного генерування ~10^{23} Бк тритію, (що на 5 порядків вище, ніж природний вміст у біосфері). При цьому обсяг викидів і скидів у процесі штатної експлуатації становитиме приблизно 10^{18} Бк/рік.

Слід зауважити, що освоєння термоядерної енергії просувається не стрімко. Міжнародний дослідницький термоядерний реактор TOKAMAK ITER, побудова якого передує створенню першої дослідної термоядерної електростанції, як очікують, буде введено в дію 2019 р., а запланована програма досліджень на ньому триватиме принаймні до 2030 р. Можливо, на той час буде споруджено і першу дослідну термоядерну електростанцію.

Тритій в Україні

На території України розміщено п'ять атомних станцій з 15 діючими блоками (3 блоки виведено з експлуатації, 2 блоки перебувають у стадії введення в експлуатацію), один дослідницький реактор (ВВР-М, Інститут ядерних досліджень НАН України) та одна критична збірка (Севастопольський інститут ядерної енергетики і промисловості). До промислових об'єктів атомної енергетики належать: об'єкт "Укриття"; шість міжобласних спецкомбінатів (МСК) із захоронення радіоактивних відходів; п'ять гірничодобувних комбінатів і два гідрометалургійних заводи з перероблення урану; близько 7 000 підприємств, які використовують радіоактивні речовини, радіоізотопні прилади та джерела іонізуючого випромінювання загальною кількістю близько 100 тис. одиниць.

Розташування на території України найнебезпечніших радіаційних об'єктів показано на рис. 7.

Наразі в Україні АЕС є одним із основних джерел виробництва електричної енергії. Загальна потужність АЕС України становить 13,8 млн. кВт, що дає 21,94% загальної енергетичної потужності країни та близько половини електроенергії. Серед 15 діючих енергоблоків — 13 реакто-

рів ВВЕР-1000 та 2 реактори ВВЕР-440. Серед країн світу Україна за покладами урану посідає шосте місце, за виробництвом електроенергії на АЕС обіймає сьоме, а за викидами тритію — чотирнадцяте місце (див. рис. 4).

За весь час на АЕС України згенеровано $2{,}3 \cdot 10^{17}$ Бк тритію. З урахуванням розпаду його кількість наразі становить $1{,}2 \cdot 10^{17}$ Бк. На рис. 8 наведено потужність джерел генерування тритію з урахуванням законодавчо визначених перспектив розвитку ядерної енергетики в Україні. Станом на 01.01.2011 АЕС України щорічно викидають в атмосферу та скидають в гідросферу до $1 \cdot 10^{15}$ Бк тритію, тобто близько 10% від загальної його активності, що генерується в реакторах.

Енергетичною стратегією України на період до 2030 р. [1] передбачено доведення потужностей АЕС до 29,5 ГВт, що забезпечуватиметься будівництвом 11 нових і 9 заміщувальних блоків АЕС типу ВВЕР-1000 і ВВЕР-1500, а також добудова 3 і 4 блоків Хмельницької АЕС.

Зокрема, у період 2011-2030 рр. передбачено:

— ввести в експлуатацію до кінця 2016 року 2 ГВт нових потужностей на майданчику Хмельницької АЕС — енергоблоки № 3 і № 4;

— ввести в експлуатацію в 2019-2021 рр. на нових майданчиках 6 ГВт потужностей АЕС;

— продовжити термін експлуатації енергоблоків № 1, № 2 та № 3 Південноукраїнської АЕС, № 1, № 2, № 3, № 4, № 5 та № 6 Запорізької АЕС, № 2 та № 3 Рівненської АЕС та № 1 Хмельницької АЕС у понадпроектний строк;

— ввести в експлуатацію у період 2024-2030 рр. заміщувальні та додаткові енергоблоки загальною потужністю 12,5 ГВт;

— розпочати виконання робіт зі зняття з експлуатації 6 енергоблоків АЕС після завершення їх продовженого строку експлуатації;

Крім цього, в період 2027-2030 рр. заплановано розпочати будівництво 6,5 ГВт нових потужностей АЕС для введення їх в експлуатацію після 2030 року.

Як бачимо, поки що заплановано будівництво реакторів ВВЕР такого ж (можливо, дещо удосконаленого) типу, як і ті, що нині працюють. Передбачено створення власного уранового паливного циклу та збільшення видобутку урану. В Україні запасів ^{235}U достатньо для внутрішнього використання протягом принаймні 100 років. При використанні швидких реакторів четвертого покоління запасів ^{238}U може вистачити на тисячоліття. За умови освоєння уранторієвого циклу запасів торію в Україні (в декілька разів більше, ніж урану) може вистачити на багато тисячоліть. Орієнтація на використання безперспективних реакторів 2-го й 3-го покоління, що відходять, але у нас мають експлуатуватись до кінця поточного століття, не обіцяє привабливого майбутнього ані ядерній енергетиці, ані економіці України.

Враховуючи значну капіталоємність і велику інерційність ядерної енергетики та порівняно великий термін експлуатації реакторів (до 60 років), освоєння та впровадження ядерних технологій 4-го покоління разом з істотним збільшенням ядерного сектору в енергетиці світу за планами триватиме до 2050 року. Україна не може собі дозволити лишатись пасивним учасником цього процесу, зважаючи на важливість ядерної енергетики для економіки й енергетичної безпеки країни та на наявність значних покладів урану. Наразі перспективним виглядає будівництво і використання в Україні важководних реакторів типу CANDU, які належать до покоління 3+ і відкривають перспективу еволюційного переходу на технології 4-го покоління шляхом використання як теплоносія води в закритичному стані [3]. Істотною перевагою цього типу реакторів

Таблиця 5. Оцінювання сучасних джерел тритію в Україні

Джерело	Стан	Період (рік)	Обсяг, Бк	На 01.01.2011
АЕС	Згенеровано	1978-2010	$2{,}6 \cdot 10^{17}$	$1{,}3 \cdot 10^{17}$
	Емісія	1978-2010	$2{,}3 \cdot 10^{16}$	$1{,}1 \cdot 10^{16}$
4 блок ЧАЕС	Згенеровано	1986	$2{,}0 \cdot 10^{15}$	$5{,}0 \cdot 10^{14}$
	Емісія	1986	$1{,}0 \cdot 10^{14}$	$2{,}5 \cdot 10^{13}$
ВЯП ВВЕР	Зберігається	2008	$1{,}6 \cdot 10^{15}$	$1{,}4 \cdot 10^{15}$
Сховища РАВ УкрДО "Радон"	Зберігається	2006	$5{,}0 \cdot 10^{15}$	$3{,}8 \cdot 10^{15}$
	Емісія з аварійних сховищ	Оцінка на 2010 р.		$3{,}0 \cdot 10^{13}$
Разом	Зберігається (без урахування згенерованого АЕС)			$5{,}7 \cdot 10^{15}$
	Емітовано в навколишнє середовище			$1{,}1 \cdot 10^{16}$

для України (враховуючи відсутність підприємств зі збагачення та перероблення палива й належних сховищ для радіоактивних відходів) полягає у тому, що як паливо можна використовувати природний або дешевий низькозбагачений уран. З іншого боку, завдяки вигідному нейтронному балансу, досяжними стають технології по допалюванню відпрацьованого легководними реакторами палива, яке містить значну кількість плутонію й урану-235, і ефективному випалюванню ізотопів високої радіотоксичності з великим (~105 років) періодом розпаду.

Освоєння цих реакторів в Україні також забезпечує диверсифікацію ядерних технологій, яка лежить в основі енергетичної та економічної безпеки. Щодо тритієвої безпеки, то враховуючи значно більшу потужність генерування тритію важководними реакторами порівняно з легководними, необхідно вживати належних заходів щодо очищення важкої води від тритію та запобігання його емісії у довкілля. Наразі відповідні технології існують, постійно вдосконалюються і мають бути застосованими.

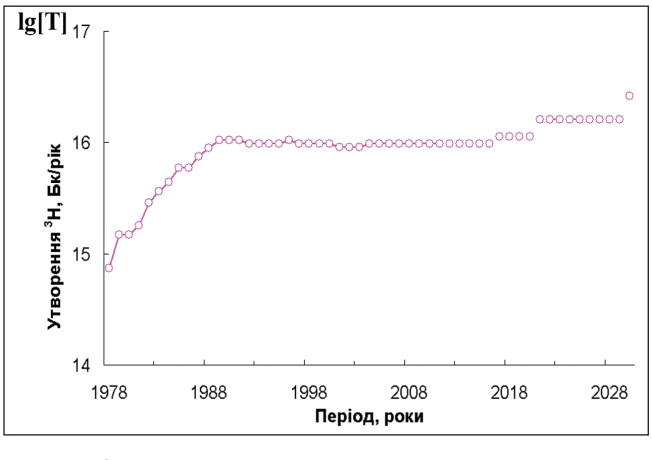


Рис. 8. Еволюція загальної потужності генерування тритію АЕС України

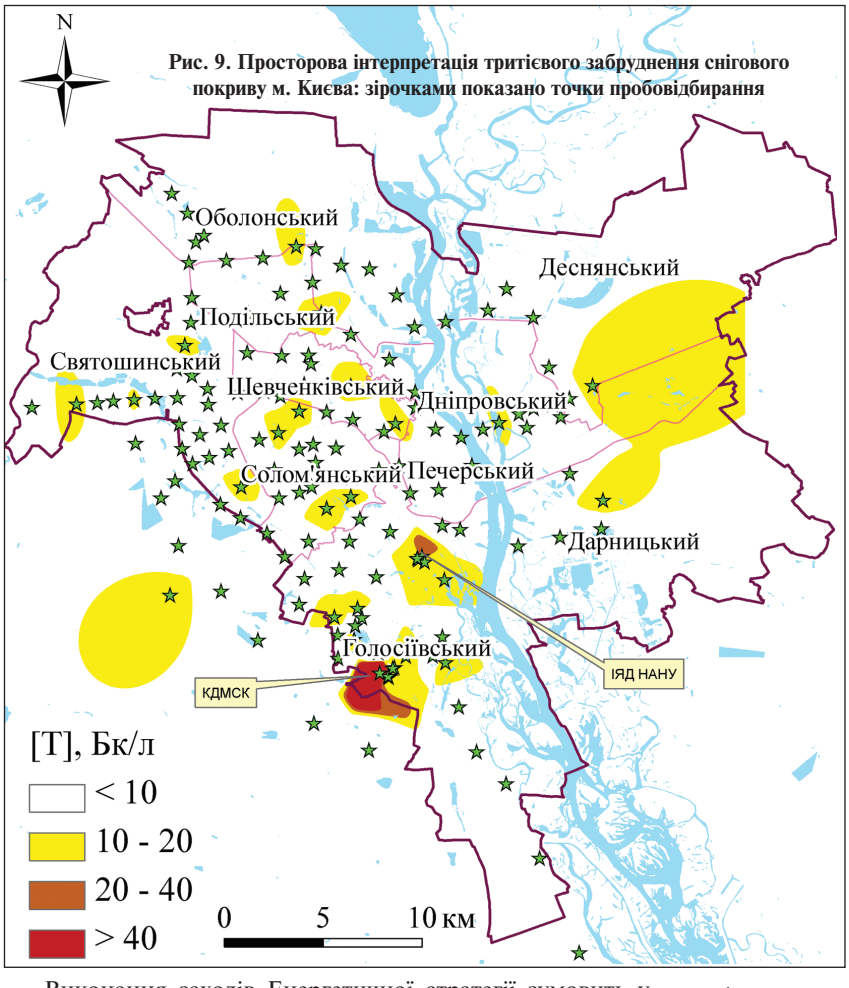


Рис. 9. Просторова інтерпретація тритієвого забруднення снігового покриву м. Києва: зірочками показано точки пробовідбирання

Виконання заходів Енергетичної стратегії зумовить у 2030 р. генерування тритію в ядерних реакторах України до $2{,}6 \cdot 10^{16}$ Бк (рис. 8) та його емісії близько $2{,}5 \cdot 10^{15}$ Бк. За період 1978-2031 р. в ядерних реакторах України буде згенеровано понад $5{,}4 \cdot 10^{17}$ Бк тритію, запас якого з урахуванням розпаду становитиме $2{,}1 \cdot 10^{17}$ Бк, а викиди і скиди АЕС у навколишнє середовище — до $2 \cdot 10^{16}$ Бк. Як бачимо, загальні обсяги тритію, що потрапить у довкілля нашої країни найближчими десятиріччями, порівняно невеликі. Але при розгляді заходів екологічної безпеки слід брати до уваги географічну неоднорідність реакторів як джерел тритію на території країни. Істотним джерелом тритію в Україні є також паливовмісні матеріали четвертого енергоблоку Чорнобильської АЕС. ЧАЕС характеризувалася найбільшими серед АЕС України нормованими викидами і скидами радіонуклідів. В період її штатної експлуатації щорічне надходження тритію в навколишнє середовище у вигляді рідких скидів становило $(0{,}7\text{-}2{,}2) \cdot 10^{12}$ Бк.

Четвертий енергоблок ЧАЕС з реактором РВПК-1000 було введено в експлуатацію в грудні 1983 р. До моменту зупинки цього енергоблоку на середній ремонт, запланований 25 квітня 1986 р., активна зона реактора містила 1659 тепловиділяючих збірок із середнім вигоранням 10,3 МВт·діб/кг [8,9]. Тобто на момент аварії в паливі та теплоносії І контуру реактора 4 енергоблоку було згенеровано до $2 \cdot 10^{15}$ Бк тритію, що станом на 01.01.2011 становить близько $5 \cdot 10^{14}$ Бк.

У процесі аварії з реактора в навколишнє середовище надійшло $3 \pm 1{,}5$ % опроміненого палива, за іншими оцінками — до 5% [5, 6]. Розрахунок показує, що з паливовмісними матеріалами, які було викинуто з активної зони реактора, в навколишнє середовище надійшло до $1 \cdot 10^{14}$ Бк тритію, що наразі становить порівняно незначну частку — $2{,}5 \cdot 10^{13}$ Бк. Цю величину слід розглядати як нижню межу оцінки, оскільки тритій виносився в атмосферу також з реактора водяною парою, що утворювалася в процесі гасіння пожежі та водним шляхом у гідросферу. Крім 2396 т урану відпрацьованого ядерного палива РВПК-1000 в Чорнобильській зоні відчуження, на діючих АЕС України зберігається 1936,8 т урану відпрацьованого ядерного палива ВВЕР. У складі цих матеріалів міститься оціночно $1{,}6 \cdot 10^{15}$ Бк тритію.

Близько $5 \cdot 10^{15}$ Бк тритію зберігається у приповерхневих сховищах радіоактивних відходів, в основному, на Київському і Харківському ДМСК, які фактично функціонують в умовах радіаційної аварії, що супроводжується витоком тритію в навколишнє середовище. За нашою оцінкою загальний обсяг емісії тритію з аварійних сховищ Київського ДМСК становить близько $1 \cdot 10^{13}$ Бк або ж близько 0,5% від розрахункової сучасної активності тритієвих відходів, що зберігаються на спецкомбінаті .

Загалом, наразі в Україні у сховищах АЕС, УкрДО "Радон" та об'єкті "Укриття" зберігається близько $6 \cdot 10^{15}$ Бк тритію та майже вдвічі більше емітовано ядерними реакторами в навколишнє середовище протягом 1978-2010 рр. (табл. 5).

Поширення тритію в зоні впливу радіаційно небезпечних об'єктів України практично не вивчається, за винятком моніторингу тритію у водних об'єктах, передусім, в ставах-охолоджувачах АЕС, та атмосферних опадах, а також у воді спостережних свердловин приповерхневих сховищ радіоактивних відходів, який виконують фахівці Мінпаливенерго, МНС України, Інституту гігієни та медичної екології ім. О.М. Марзєєва, Українського науково-дослідного інституту екологічних проблем Мінприроди України, Науково-інженерного центру радіогідрогеоекологічних полігонних досліджень НАН України, Українського державного об'єднання "Радон" та інших організацій.

З 1993 р. фахівцями Інституту геохімії навколишнього середовища НАН та МНС України здійснюються спостереження за станом тритієвого забруднення навколишнього природного середовища м. Києва внаслідок радіаційної аварії на сховищах радіоактивних відходів Київського ДМСК УкрДО "Радон" [4]. У санітарно-захисній зоні спецкомбінату спостерігаються істотні перевищення фонових показників тритієвого забруднення атмосфери, ґрунту і рослинності, а також забруднення підземного водоносного горизонту до рівнів, що багатократно перевищують чинні в Україні допустимі концентрації. Потужність річного викиду тритію з аварійних сховищ в атмосферу оцінюють на рівні емісії з реактора ВВЕР при виробленні 10 МВт електроенергії, що визначило необхідність дослідження у 2010 р. тритієвого забруднення снігового покриву м. Києва.

Встановлено, що на більшій частині території м. Києва вміст тритію у сніговому покриві не перевищує фонових показників (4-10 Бк/л розтопленого снігу). Відзначено два основні джерела підвищених концентрацій, головним із яких є КДМСК УкрДО "Радон" на північно-західній околиці міста (до 3000 Бк/л). На цьому фоні нехтовно слабким джерелом тритієвого забруднення міста є Інститут ядерних досліджень, на території якого концентрації три-

тію у снігу в 100 разів менші і сягають 35 Бк/л. Обидва джерела розташовано в Голосіївському районі. У північному напрямку від сховища радіоактивних відходів спостерігають широкий сектор дещо підвищених до 14 Бк/л концентрацій тритію у снігу. Плямистість цього північного сліду пояснюється перепадами абсолютних відміток рельєфу, щільністю та характером міської забудови, що визначає напрямок та швидкість приземних повітряних потоків (рис. 9).

Центральна геофізична обсерваторія розташована на відстані близько 4 км на південний захід від Інституту ядерних досліджень та 3 км на північний захід від Київського сховища радіоактивних відходів. Отримані результати дозволяють припустити, що основним джерелом підвищеного вмісту тритію в опадах у районі Центральної геофізичної обсерваторії, які фіксувалися у 1990-1995 рр. є не Інститут ядерних досліджень, а Київське сховище радіоактивних відходів.

Нестабільність повітряних потоків у межах міської забудови і вплив обох джерел викиду тритію добре ілюструються даними прямих атмосферних вимірювань наприкінці травня 2008 р. в межах студентського містечка між вул. Ломоносова і пр. Академіка Глушкова. Абсолютні значення вмісту тритію в атмосферному повітрі в період спостережень були в 50-1000 разів нижчі за допустимі концентрації ($ДК_B^{inhal}$ = 100 Бк/м^3 [2]). Отримані дані свідчать, що тритієве забруднення атмосферного повітря Київської міської агломерації наразі не становить радіоекологічної небезпеки для населення, проте вимагає систематичного контролю.

Як видно з табл. 7, за обсягом тритієвої емісії в навколишнє середовище України провідне місце займають атомні електростанції (у 500 разів більше, ніж приповерхневі сховища РАВ). Враховуючи перспективи розвитку ядерної енергетики нашої країни, визначені Енергетичною програмою на період до 2030 р., першочерговим завданням вбачаємо проведення тритієвого обстеження складників довкілля регіонів України (поверхневих і підземних вод, донних відкладів водоймищ, рослинності, тварин, приземної атмосфери) та розроблення тритієвого складника моніторингу.

Висновки

Згенерований у ядерних реакторах тритій є основним сучасним джерелом цього ізотопу в біосфері, яке за потужністю наразі зрівнялося з глобальним його запасом, утвореним внаслідок ядерних випробувань в середині минулого століття. Вміст тритію в біосфері на третину зумовлений експлуатацією ядерного паливного циклу та у 22,5 рази перевищує його постійно підтримуваний природний рівень. Щорічна емісія тритію підприємствами ЯПЦ сягає $3{,}6 \cdot 10^{17}$ Бк тритію, що в 6 разів перевищує його утворення в природі.

У зоні впливу АЕС з важководними реакторами тритій є одним із основних дозотвірних елементів. Важководні реактори Індії, Південної Кореї, Канади, Аргентини і Румунії забезпечують понад 80% емісії тритію АЕС світу.

Водночас АЕС США, Франції та Японії, що виробляють 56% "ядерної" електроенергії в світі, забезпечують близько 10% емісії тритію в навколишнє середовище. Україна за обсягами тритієвої емісії обіймає 14 місце в світі (а за сумарною потужністю діючих АЕС — сьоме).

Основна кількість тритію, утвореного в ядерному паливному циклі, надходить у довкілля з технологічними розчинами заводів з перероблення відпрацьованого ядерного палива. Емісія тритію при переробленні відпрацьованого ядерного палива вдвічі перевищує його викиди і скиди протягом кампанії ядерних реакторів. Отже, при освоєнні і розвитку ядерного паливного циклу слід враховувати тритієву загрозу, щоб належним чином налагодити виробничий процес.

Динаміка розвитку ядерної енергетики світу свідчить про вичерпання можливостей сучасних технологій для задоволення енергетичних потреб та вказує на необхідність "технологічного стрибка", який визначатиметься впровадженням реакторів четвертого покоління та, з часом, освоєнням термоядерного циклу. Перехід на ядерні технології наступного покоління найближчими десятиріччями є для України необхідним кроком, який вимагатиме належного контролю за надходженням тритію в довкілля.

Попри відносно низьку екологічну загрозу тритієвого забруднення в Україні, вивчення механізмів і наслідків радіобіологічного впливу тритію залишається актуальною проблемою екологічної безпеки, над розв'язанням якої маємо ефективно співпрацювати з міжнародною науковою спільнотою. Постійний, систематичний і ефективний тритієвий моніторинг поблизу ядерних промислових об'єктів і реакторів має стати складником забезпечення екологічної безпеки країни. Що ж до проблеми тритію, накопиченого у приповерхневих сховищах Київського міжобласного спецкомбінату в Пирогові, то вона вимагає нагального належного розв'язання.

Поки що міжнародні квоти на викиди введено лише для парникових газів, враховуючи те, що порівняно з доіндустральною епохою вміст вуглекислого газу в атмосфері збільшився на 31%, а метану — втричі. Сучасний вміст тритію в біосфері більш як у 20 разів перевищує його природний рівень і буде надалі збільшуватися з розвитком ядерної енергетики. Тому слід очікувати введення міжнародних квот на викиди тритію, яких доведеться дотримуватись при застосуванні перспективних важководних реакторів і, особливо, термоядерних реакторів. Отже вже зараз необхідно розвивати технології, що запобігатимуть надходженню утвореного в ядерних реакторах тритію в навколишнє середовище і, водночас, забезпечуватимуть його раціональне використання.

Література

1. Енергетична стратегія України на період до 2030 року. ІІ. Прогнозування балансів паливно-енергетичних ресурсів. Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 15 березня 2006 р. № 145-р. — К., 2006. — 129 с.

2. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97). Державні гігієнічні нормативи. — К., 1997. — 120 с.

3. **Патон Б.Є., Бакай О.С., Бар'яхтар В.Г., Неклюдов І.М.** Про стратегію розвитку ядерної енергетики в Україні //Світогляд. — 2010. — № 5 (25). — С. 4-17

4. **В.В. Долін, О.В. Пушкарьов, І.Ф. Шраменко та ін.** Тритій у біосфері. Ред. Е.В. Соботович, В.В. Долін. —К.: Наук. думка, 2012 (у друці).

5. **В.М. Антропов, Р.Я. Белєвцев, Л.М. Бойко та ін.** Чорнобильська катастрофа — 20 років: участь Інституту геохімії навколишнього середовища в подоланні наслідків. Ред. Е.В.Соботович, Г.М. Бондаренко, Г.В. Лисиченко. — К.: Салютіс, 2006. — 408 с.

6. Чорнобильська катастрофа. Ред. В.Г. Бар'яхтар. — К.: Наукова думка, 1996. — 575 с.

7. Investigation of the Environmental Fate of Tritium in the Atmosphere: Report CC172-51/2009E-PDF Minister of Public Works and Government Services. — Ottawa, Ontario: Canadian Nuclear Safety Commission, 2009. — 110 p.

8. Management of waste containing Tritium and Carbon-14 // IAEA Technical report series. — Vienna, 2004. — No. 421. — 120 p.

9. Sources and Effects of Ionizing Radiation: UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly. — New York: United Nations, 2010. — V. I. — 245 p.

10. Standards and Guidelines for Tritium in Drinking Water. — Ottawa, Ontario: Canadian Nuclear Safety Commission, 2008. — 84 p.