

УДК 629.039.58 + 004.942

О.В. КОВАЛЕНКО

МОДЕЛЮВАННЯ МІГРАЦІЇ ТРИТІО В НАВКОЛИШНЬОМУ СЕРЕДОВИЩІ

***Анотація.** В роботі проведено дослідження вимірів накопичення тритію у навколишньому середовищі дослідницького ядерного реактора Інституту ядерних досліджень НАН України. На основі фактичних вимірів вмісту тритію у талій воді снігового покриву проведено моделювання міграції тритію з врахуванням навколишніх умов. Акцентована увага на недопущенні зовнішніх порушень санітарно-захисної зони. Зроблені висновки щодо безпеки роботи дослідницького ядерного реактора та тритієвих лабораторій.*

***Ключові слова:** тритій, модель, регресія, адекватність, прогноз.*

Вступ

Водень є однією з головних речовин життєдіяльності та функціонування живих організмів. Це пояснюється надзвичайною роллю води в цих процесах. Унаслідок ізотопного обміну важкі ізотопи водню можуть легко і швидко включатися у біохімічні процеси та замішувати атоми водню на тритій.

Ядро тритію нестабільне і розпадається з основного стану, перетворюючись в ядро гелію теж в основному стані. Тому компонента бета-випромінювання одна і її абсолютна інтенсивність дорівнює 100 %. Період напіврозпаду тритію 12,34 років. Зовнішнє опромінення бета-електронами тритію практично відсутнє, що визначає низький фактор радіаційної небезпеки при його переробці та використанні. Проте основну частину своєї енергії бета-електрони тритію витрачають на взаємодію з електронними оболонками атомів речовини середовища, в якому вони рухаються, що призводить до іонізації останньої. Бета-електрони тритію мають найвищу серед бета-випромінювань інших ізотопів іонізаційну здатність – 1900 пар іонів на 1 см проникнення. Основні фізико-хімічні властивості тритію взагалі аналогічні властивостям водню [1]. Тому він швидше виводиться з організму людини порівняно з іншими ізотопами, проте не зменшує своєї небезпеки, а, навпаки, вимагає особливого підходу в організації заходів з попередження проникнення ізотопів тритію до організму людини.

Зазначена тема є надзвичайно актуальною у ракурсі ряду публікацій [2-5] у соціальних мережах та засобах масової інформації щодо небезпеки дослідницького ядерного реактора Інституту ядерних досліджень НАН України (ІЯД НАНУ). Зокрема, підняте питання, наскільки є небезпечним дослідницький ядерний реактор для довкілля у теперішній час і у разі реалізації проекту із забудови навколишніх територій багатопверховими житловими будинками. У зв'язку з тим, що тритій відноситься до числа найважливіших радіонуклідів дозоутворення, які характеризують та визначають радіаційний фон біля підприємств атомної енергетики та ядерного синтезу, зазначені питання і будуть розглянуті на прикладі міграції тритію.

Метою роботи є дослідження вимірів накопичення тритію у навколишньому середовищі дослідницького ядерного реактора ІЯД НАНУ та на його основі – моделювання міграції тритію з врахуванням навколишніх умов.

Завдання роботи:

- розглянути особливості біогеоміграції тритію;
- дослідити характеристики місцевості та розглянути фактичні показники наявності тритію в навколишньому середовищі;
- представити прогностичні моделі можливого розповсюдження тритію за різними шарами навколишнього середовища.

Слід зазначити, що аналізу та моделюванню подій забруднення території тритієм приділяється багато уваги в роботах вчених всього світу. Україна після Чорнобильської аварії значно просунулася у дослідженнях з впливу радіонуклідів, у тому числі і тритію, на організми живих істот. Найбільш відомий дослідник в Україні і за кордоном в цій галузі – доктор біологічних наук Б.С. Прістер з Інституту проблем безпеки АЕС НАН України [6]. Також серед українських науковців, які займаються дослідженням та моделюванням подій, пов'язаних з імовірним забрудненням тритієм, можна назвати представників харківської школи з Українського науково-дослідного інституту екологічних проблем – Г.Д. Коваленка, В.В. Турбаєвського [7-8], а також відзначити нову роботу колективу авторів за редакцією академіка НАН України Е.В. Собоновича та доктора геологічних наук В.В. Доліна [9], та ін.

1. Особливості біогеоміграції тритію

Незважаючи на змістовний ряд досліджень, в Україні тритієвій проблемі не приділяється належної уваги, відповідної до її значущості. При будь-яких передаварійних ситуаціях чи аваріях на АЕС активність тритію, що надходить в навколишнє природне середовище, зростає на декілька порядків з відповідним негативним впливом.

До людського організму радіоактивні речовини надходять через дихальні шляхи, кишково-шлунковий тракт і шкіру. Через шкіру серед усіх ізотопів найбільш легко проникає тритій, який також надходить через органи травлення з водою, а при випаровуванні забрудненої тритієм води разом із повітрям потрапляє до органів дихання.

Тритій утворюється в активній зоні реактора в результаті потрійного поділу та інших реакцій. З реактора тритій виділяється або у вигляді тритій-газу (НТ), або у вигляді тритієвої води (НТО) і потрапляє в атмосферу, в ґрунтові води, в річки та озера. Газоподібний тритій НТ дуже швидко окислюється і переходить в НТО. При наявності тритію людський організм піддається впливу бета-випромінювання з максимальною енергією 18 кеВ. Період напіввиведення для тритію дорівнює 12 діб.

Незважаючи на те, що функціонуванню ізотопів вуглецю і кисню присвячено численні праці, міграцію ізотопів водню в процесі життєдіяльності організмів розглянуто в роботах науковців дуже фрагментарно. Спираючись на дослідження [9], можна представити наступну стислу картину біогеоміграції тритію.

За характером розподілу ізотопів водню і вуглецю в організмі людини мікробіальний метан, який утворюється в процесі CO_2 редуції, відрізняється від метану, що виділяється в результаті ферментації ацетату. Проте конкретна

роль активних організмів у фракціонуванні ізотопів водню не встановлена. Ізотопний склад водню і кисню, що в процесі фотосинтезу переходять до вуглеводів рослин із води, практично повністю визначається ізотопним складом води. Ізотопи водню фракціуються під час перебігу процесів випаровування-конденсації води. Варіації відношень $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^2\text{H}/^1\text{H}$ прямо корелюють із середньорічною температурою. Температура конденсації води значною мірою впливає на її ізотопний склад.

Процес трансформації водної форми тритію НТО в «органічно зв'язаний» ізотоп тритію ^3H підпорядкований дискримінації ^3H по відношенню до ^1H , що призводить до зниження надходження ^3H в органічні сполуки приблизно на 20 %. Це означає, що відношення максимальної питомої активності ^3H в органічних фракціях і вільній воді рослин після одноразового його надходження вже через кілька діб становить близько 0,05. За постійного надходження ^3H в навколишнє середовище питомі активності ^3H у складі вільної води й «органічно зв'язаного» ^3H наростають у часі, як зазначено у [9], ймовірно, експоненціально.

Виведення ^3H з рослин визначається процесом водообміну. Основний період напіввиведення, характерний для 90 % виведення водної форми тритію НТО, практично не залежить від кліматичних умов і коливається від декількох годин до 10-20 діб.

Питому активність ^3H у складі вільної води рослин можна вважати практично однаковою в усіх органах рослини лише за умови однакової його активності в атмосферній і ґрунтовій волозі, інакше спостерігаються істотні відмінності, обумовлені градієнтом концентрації ^3H в системі атмосфера-рослина-ґрунт. Тобто, корені та інші підземні органи відносно активно збагачуються ^3H . Розподіл органічно зв'язаного тритію (ОЗТ) у тканинах і органах рослин неоднорідний і визначається біохімічними характеристиками структур. Наприклад, у жирах, протеїнах, зародках зерна кукурудзи ОЗТ в 1,4-2,3 рази більше (у розрахунку на суху речовину), ніж в оболонках, найвищий вміст ОЗТ характерний для ліпідів і фракції нуклеїнових кислот, як зазначено у [9].

Рослини та ґрунтові бактерії є каталізаторами окиснення газоподібного тритію НТ, що міститься в атмосфері. Це спричиняє підвищення питомої активності ^3H у ґрунтовій волозі порівняно з його питомою активністю у вільній воді рослин. Швидкість трансформації газоподібного тритію НТ у водну форму тритію НТО в рослинному покриві оцінюють приблизно в 1 % за 48 год. [9].

Приблизно із середини минулого століття почали приділяти увагу дослідженням взаємодії тритію з тканинами дерев, а з 80-х років того ж століття – розпочали дослідження розподілу тритію в річних кільцях дерев. Було виявлено, що до 1990-х років активність тритію у рідких атмосферних опадах стала меншою за його активність у деревині, що зумовлено накопиченням тритію у складі деревини. Після припинення ядерних випробувань концентрація тритію в атмосфері почала поступово зменшуватись, у той час як у деревині процес «очищення» відбувається повільніше, що можна пояснити накопиченням тритію у тканинах дерев в обмінній формі. Це підтверджується і рядом досліджень, які проводяться ІЯД НАНУ та будуть викладені нижче.

Середньорічна активність тритію у вільній воді становить 151 Бк/дм^3 за коливань від 25 до 214, ОЗТ – 58 і коливається від 14 до 109 Бк/дм^3 .

У ґрунті тритій знаходиться у двох основних формах. Основна його частина міститься у вільній воді ґрунту (НТО) і відповідає вмісту тритію в атмосферній воді. У верхньому 4-сантиметровому шарі ґрунту міститься 25 % запасу тритієвої води. У міру заглиблення в гумус вміст тритієвої води знижується до 4 % у шарі 14-16 см, а у шарі 16-18 см – зростає до 10 % загального запасу. Нижче від 16 см міститься 40 % загального запасу тритію [9].

Співвідношення тритій/протій у воді, отриманій при прожарюванні повітряно-сухого ґрунту, змінюється в широких межах із тенденцією до збільшення на геохімічних бар'єрах. За тим же джерелом [9], динаміка питомих концентрацій тритію практично відповідає щільності забруднення ґрунту.

Після видалення ґрунтової вологи (вільна вода) деяка частина тритію залишається у ґрунті в іонообмінній та сорбованій формах. Оскільки 98-99 % тритію в ґрунті представлено водною формою, то процеси ізотопного обміну водню в системі ОЗТ-НТО в середовищі ґрунту істотно не впливають на ізотопний склад органічної речовини живого й неживого компонентів екосистеми.

Враховуючи викладене, можна зробити наступне узагальнення: тритій, як нуклід водню, характеризується високою міграційною здатністю у воді, що обумовлює його активність у обмінних процесах живих організмів та переміщення в системі атмосфера-рослина-ґрунт.

2. Характеристика місцевості біля дослідницького ядерного реактора та фактичні показники тритію у навколишньому середовищі

Дослідницький ядерний реактор ВВР-М Інституту ядерних досліджень НАН України використовується як потужне джерело нейтронів для проведення фундаментальних і прикладних досліджень. Він розташований на Багриновій горі, яка обмежена проспектом Науки та вулицями Лисогірська, Ракетна та Панорама.

Ґрунт території – відносно багатий, сформований на лісових відкладах, проте з великою присутністю глини та глиноземів. Структура – пориста, багата вимоїнами та кавернами. Рослинне покриття – широколистяні дерева (дуби, каштани, берези, ясени, липи, клени). Серед дерев зустрічаються елементи підліску – калина, горобина, бузина, ожина. Трав'яний ярус – характерний для лісових територій з більшістю вологолюбивих рослин.

Місцевість довкола дослідницького реактора ІЯД НАНУ багата дрібними ссавцями, серед яких є види, занесені до Червоної книги України.

Основним завданням при роботі дослідницького ядерного реактора та лабораторії ІЯД НАНУ є забезпечення безпеки персоналу, населення навколишніх територій та довкілля. Всі 50 років роботи ІЯД НАНУ проводився постійний радіаційний контроль та моніторинг впливу на середовище.

Підготовка зразків та вимірювання вмісту в них радіонуклідів проводяться в лабораторії Центру екологічних проблем атомної енергетики (ЦЕПАЕ). Апаратура, що використовується для вимірювань, атестована та проходить регулярні планові перевірки. При виконанні досліджень використовуються, в основному, загальноприйняті методики. Похибки вимірювань – в межах норми [10].

Навколо реактора ІЯД НАНУ встановлена санітарно-захисна зона. В цій зоні існує шість точок замірів показників, чотири з яких (ГІд-1, 3-1, ПнЗ-1, Пн-1) розташовані на відстані не менше трьох висот вентиляційної труби реактора (200 м), а дві (С-1, ПдС-1) – на відстані 100 і 120 м від огорожі реактора. У зоні спостереження знаходиться 12 точок: шість – на відстані до 2 км від вентиляційної труби реактора (Пн-2 – Інститут гідрометеорології; С-2 – вул. Ракетна, 17/1; ПдС-2 – вул. Панорамна, 28/2; Пд-2 – с. Корчувате; 3-2 – Національний аграрний університет; ПнЗ-2 – вул. Добрий шлях), шість точок – на відстані до 5 км від вентиляційної труби реактора (ПнЗ-3 – вул. Щорса; С-3 – Осокорки; ПдС-3 – Нижні сади; Пд-3 – пр. Охотський, 14; 3-3 – вул. Теслярська, 6; ПнЗ-3 – вул. Народна) [11].

При дослідженні забруднення території тритієм, система радіаційного контролю об'єктів навколишнього природного середовища складається із визначення загальної питомої бета-активності води в основних колекторах реактора й тритієвих лабораторій, а також концентрації тритію у скидних водах основних колекторів (двічі на місяць), у талій воді снігового покриву та в березовому соку (раз на рік).

Для досліджень регулярно проводиться відбір зразків скидних вод з основних колекторів реактора та тритієвих лабораторій. Значення загальної питомої активності тритію скидних вод за 2012-2014 роки представлено в табл. 1.

Таблиця 1 – Питома активність тритію у скидних водах у 2012-2014 рр., Бк/л

№ п/п	Дата відбору	Вода після «Ясеня»	Вода по вулиці Лисогірській
1	2	3	4
2012			
1	27.02	74,3 ± 4,1	2206,1 ± 50,7
2	29.03	85,7 ± 4,5	75,1 ± 4,1
3	27.04	64,5 ± 3,9	452,1 ± 12,6
4	29.05	71,9 ± 4,1	929,8 ± 22,3
5	02.07	288,6 ± 12,3	88,7 ± 4,8
6	31.07	167,9 ± 6,9	568,9 ± 16,5
7	28.08	71,3 ± 4,3	89,5 ± 4,7
8	02.10	96,1 ± 4,8	105,4 ± 5,1
9	01.11	80,9 ± 4,5	78,0 ± 4,2
10	28.12	79,2 ± 4,4	83,2 ± 4,4
2013			
13	28.01	70,7 ± 4,2	120,2 ± 6,1
14	28.02	63,3 ± 4,0	75,5 ± 4,0
15	08.04	131,4 ± 6,3	420,3 ± 12,6
16	29.04	66,5 ± 3,8	123,1 ± 5,9
17	30.05	85,5 ± 3,2	317,1 ± 10,8
18	01.07	107,0 ± 5,6	153,7 ± 6,9
19	09.08	76,6 ± 4,4	116,3 ± 5,3
20	03.09	73,1 ± 4,2	71,0 ± 4,3
21	01.10	71,4 ± 4,2	91,7 ± 4,8
22	01.11	79,9 ± 4,6	82,1 ± 4,4
23	02.12	77,4 ± 4,3	174,5 ± 6,8
24	30.12	71,0 ± 4,0	1067,6 ± 25,6

Продовження таблиці 1

1	2	3	4
2014			
25	06.02	63,9 ± 3,7	321,1 ± 11,5
26	03.03	96,0 ± 5,9	223,4 ± 12,3
27	01.04	63,8 ± 3,8	590,9 ± 16,2
28	06.05	67,3 ± 3,8	400,9 ± 12
29	06.06	61,8 ± 3,6	78,1 ± 4,0
30	27.06	67,7 ± 4,1	70,9 ± 4,0
31	30.07	90,5 ± 4,9	88,4 ± 4,4
32	03.10	62,0 ± 3,7	156,1 ± 6,1

Як видно з наведених даних, спостерігаються досить великі розбіжності в значеннях загальної питомої активності в дослідних зразках (особливо в скидних водах по вул. Лисогірській), що можна пояснити їхньою залежністю від виробничої діяльності тритієвих лабораторій. Проте, усі отримані результати вимірювань радіоактивного забруднення води в основному є нижчими за допустимі концентрації для населення (категорія В). За межами санітарно-захисної зони всі показники за тритієм знаходяться в межах норми.

Визначення вмісту тритію у березовому соку у 2012-2014 рр. представлено в табл. 2.

Таблиця 2 – Питома активність тритію у березовому соку у 2012-2014 рр., Бк/л

№ точки відбору	Корпус №26	Реактор	Корпус ЦЕПАЕ	Корпус №26	Реактор	Корпус ЦЕПАЕ	Корпус №26	Реактор	Корпус ЦЕПАЕ
	2012			2013			2014		
1	104,0 ± 5,8			183,9 ± 14,2			124,3 ± 5,5		
2	102,0 ± 7,6			113,7 ± 7,0			121,3 ± 6,8		
3	96,3 ± 5,3			159,8 ± 10,1			117,1 ± 5,3		
4		74,7 ± 4,8			73,3 ± 4,5			89,3 ± 4,6	
5		81,3 ± 4,3			79,8 ± 4,5			86,1 ± 4,5	
6		407,5 ± 12,2			84,8 ± 6,3			66,6 ± 4,0	
7			77,8 ± 7,0			80,6 ± 6,8			61,6 ± 4,1
8			64,5 ± 4,4			81,2 ± 5,5			85,7 ± 6,9
Реперна точка (селище Вишневе) – 102,5 ± 6,3			Реперна точка (селище Вишневе) – 70,5 ± 6,3			Реперна точка (селище Вишневе) – 55,8 ± 3,3			

Дати відбору проб березового соку вибираються під час найбільшого руху соку берез. Так, дата відбору 2012 року – 3 квітня, 2013 року – 15 квітня, 2014 року – 26 березня.

Як можна зазначити з наведених даних, в межах санітарно-захисної зони вміст тритію у соку берез майже вдвічі вищий, ніж у реперній точці с. Вишневе. Проте рівень ізотопу тритію у соку берез все ж має тенденцію до зниження, що можна обґрунтувати значним підвищенням безпекових заходів у тритієвій лабораторії та на реакторі.

Визначення вмісту тритію у талій воді снігового покриву у 2012-2014 рр. представлено в табл. 3.

Таблиця 3 – Питома активність тритію у талій воді снігового покриву у 2012-2014 рр.

№ точки відбору	Питома активність, Бк/л	№ точки відбору	Питома активність, Бк/л
2012			
Корпус 113		Корпус 26	
1	115,1 ± 5,9	1a	85,7 ± 5,0
2	87,8 ± 5,1	2a	73,4 ± 4,1
3	73,8 ± 4,4	3a	78,1 ± 4,1
4	93,6 ± 4,9	4a	131,0 ± 5,9
5	602,2 ± 15,7	5a	112,7 ± 5,2
6	103,0 ± 4,9	6a	96,3 ± 4,7
7	74,4 ± 4,1	7a	97,2 ± 4,9
8	78,6 ± 4,2	8a	102,2 ± 4,9
9	77,0 ± 4,2		
Реперна точка (Обухівський район) – 50,3 ± 6,2			
2013			
Корпус 113		Корпус 26	
1	98,3 ± 4,7	1a	82,1 ± 4,5
2	76,2 ± 4,2	2a	84,9 ± 4,7
3	101,7 ± 5,1	3a	73,7 ± 4,3
4	74,9 ± 4,3	4a	93,4 ± 5,0
5	81,9 ± 4,5	5a	87,6 ± 4,5
6	78,8 ± 4,2	6a	90,6 ± 4,5
7	109,2 ± 5,2	7a	102,3 ± 5,1
8	74,0 ± 4,1	8a	103,5 ± 4,9
9	77,1 ± 4,2		
Реперна точка (Обухівський район) – 44,3 ± 5,2			
2014			
Корпус 113		Корпус 26	
1	136,4 ± 5,9	1a	185,8 ± 7,2
2	138,9 ± 6,0	2a	144,2 ± 7,6
3	145,8 ± 6,0	3a	210,1 ± 7,8
4	154,4 ± 6,0	4a	220,9 ± 8,2
5	156,4 ± 5,9	5a	249,5 ± 8,2
6	170,1 ± 6,6	6a	230,7 ± 8,5
7	150,6 ± 6,2	7a	159,5 ± 6,5
8	163,6 ± 6,5	8a	183,3 ± 7,3
9	128,7 ± 5,5		
Реперна точка (Обухівський район) – 74,5 ± 5,2			

Дати відбору зразків талої води снігового покриву обираються за наявності снігового шару до початку його масового розтавання. Для 2012 року відбір проб відбувався 21 лютого, 2013 року – 5 лютого, 2014 року – 10 лютого. Як видно з таблиці, питома активність тритію коливалася в межах від 73 до 602 Бк/л у 2012 році, від 47 до 109 Бк/л у 2013 році та від 128 до 249 Бк/л у 2014 році. Зниження межі коливання вказує на підсилення безпекових заходів на об'єкті, що досліджується.

3. Прогнозні моделі розповсюдження тритію у воді, ґрунті та повітрі

Для прогнозування розповсюдження тритію на території, що досліджується, та за її межі, за основу взяті дані щодо питомої активності тритію у талій воді снігового покриву за десять років – з 2004 р. по 2013 р. включно, за найменшим та найбільшим показниками, з врахуванням максимальних, мінімальних і середніх відхилень по всіх замірах (табл. 4), а також розраховані дані на прогностичний період.

У даному випадку тала вода снігового покриву дає найбільш змістовну картину щодо міграції тритію в навколишньому середовищі: при таненні снігу частина ізотопів тритію залишається в ґрунті, частина проникає до підземних вод, а частина піднімається в атмосферу при випаровуванні. Тоді, враховуючи [12], можна побудувати приблизні зони забруднення тритієм підземних вод, ґрунту та повітря.

Таблиця 4 – Узагальнені показники питомої активності тритію у талій воді снігового покриву у 2004-2013 рр.

Показник	Питома активність, Бк/л	Відхилення макс., Бк/л	Відхилення мін., Бк/л	Середнє відхилення, Бк/л	Показник реперної точки, Бк/л
№	У	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
1	334	91,2	47,6	74,5	69,4
2	179,3	91,2	47,6	74,5	33
3	634,8	51,3	23,5	24,1	111,6
4	81,3	51,3	23,5	24,1	66,8
5	1431,2	53,5	22,2	30,3	70,6
6	206,2	53,5	22,2	30,3	42
7	1267	87,6	16,2	23,5	52,6
8	15,8	87,6	16,2	23,5	10
9	748	40,3	24,2	30,5	95,7
10	285,7	40,3	24,2	30,5	91,1
11	226,3	12,2	7,9	9,8	74,9
12	99,2	12,2	7,9	9,8	61,9
13	140	6	4	5	52
14	78	6	4	5	44
15	169,5	6,8	3,8	4,3	59,4

Продовження таблиці 4

16	64,3	6,8	3,8	4,3	47,4
17	602,2	15,7	4,1	5,9	56,5
18	73,4	15,7	4,1	5,9	44,1
19	109,2	5,2	4,1	4,2	49,5
20	73,7	5,2	4,1	4,2	39,1
21	-	91,2	47,6	5,9	56,5
22	-	5,2	3,8	5,9	44,1
23	-	51,3	23,5	4,2	49,5
24	-	15,7	4,1	4,2	39,1

Приведемо специфікацію моделі до наступного вигляду:

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot X_1 + \alpha_2 \cdot X_2 + \alpha_3 \cdot X_3 + \alpha_4 \cdot X_4 \quad (1)$$

та знайдемо МНК-оцінки параметрів моделі. Для цього побудуємо вектор-стовпчик Y і матрицю X .

$Y =$	334	$X =$	1	91,2	47,6	74,5	69,4
	179,3		1	91,2	47,6	74,5	33
	634,8		1	51,3	23,5	24,1	111,6
	81,3		1	51,3	23,5	24,1	66,8
	1431,2		1	53,5	22,2	30,3	70,6
	206,2		1	53,5	22,2	30,3	42
	1267		1	87,6	16,2	23,5	52,6
	15,8		1	87,6	16,2	23,5	10
	748		1	40,3	24,2	30,5	95,7
	285,7		1	40,3	24,2	30,5	91,1
	226,3		1	12,2	7,9	9,8	74,9
	99,2		1	12,2	7,9	9,8	61,9
	140		1	6	4	5	52
	78		1	6	4	5	44
	169,5		1	6,8	3,8	4,3	59,4
	64,3		1	6,8	3,8	4,3	47,4
602,2	1	15,7	4,1	5,9	56,5		
73,4	1	15,7	4,1	5,9	44,1		
109,2	1	5,2	4,1	4,2	49,5		
73,7	1	5,2	4,1	4,2	39,1		

Виразуємо оцінки регресійних коефіцієнтів за формулою:

$$A = (X' X)^{-1} \cdot X' Y, \quad (2)$$

де X' - матриця, транспонована до X .

$$\begin{aligned}
 X' &= \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 91,2 & 91,2 & 51,3 & \dots & 5,2 \\ 47,6 & 47,6 & 23,5 & \dots & 4,1 \\ 74,5 & 74,5 & 24,1 & \dots & 4,2 \\ 69,4 & 33 & 33 & \dots & 39,1 \end{vmatrix} \\
 X' X &= \begin{vmatrix} 20 & 932,4 & 418,6 & 444,4 & 1360,8 \\ 932,4 & 47227,7 & 0 & 0 & 0 \\ 418,6 & 0 & 8570,8 & 0 & 0 \\ 444,4 & 0 & 0 & 17447,26 & 0 \\ 1360,8 & 0 & 0 & 0 & 78867,8 \\ -0,0186 & 0,00037 & 0,00091 & 0,0004748 & 0,00032 \\ 0,00037 & 1,4E-05 & -1,8E-05 & -9,37E-06 & -6,3E-06 \\ 0,00091 & -2E-05 & 7,2E-05 & -2,32E-05 & -1,6E-05 \\ 0,00047 & -9E-06 & -2,3E-05 & 4,522E-05 & -8,2E-06 \\ 0,00032 & -6E-06 & -1,6E-05 & -8,19E-06 & 7,1E-06 \end{vmatrix} \\
 (X' X)^{-1} &= \begin{vmatrix} 6819,1 & & & & \\ 0 & & & & \\ 0 & & & & \\ 0 & & & & \\ 0 & & & & \end{vmatrix} \\
 X' Y &= \begin{vmatrix} 6819,1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} \quad a = \begin{vmatrix} -127,1001 \\ 2,5092943 \\ 6,2076012 \\ 3,2373731 \\ 2,1930084 \end{vmatrix}
 \end{aligned}$$

В результаті за моделлю (1) отримаємо функцію регресії з врахуванням оцінок, що були знайдені:

$$Y = -127,1 + 2,5 \cdot X_1 + 6,2 \cdot X_2 + 3,2 \cdot X_3 + 2,2 \cdot X_4. \tag{3}$$

Подальша перевірка адекватності моделі показує відносно незначну погрішність, обумовлену тим, що з усіх замірів беруться лише найбільші та найменші показники, а також дані з реперних точок, що дає досить великий розкид значень показників.

За отриманою функцією (3) знайдемо точкові та інтервальні прогнози питомої активності тритію у талій воді снігового покриву при заданих показниках на перспективу (табл. 5).

Таблиця 5 – Прогноз питомої активності тритію у талій воді снігового покриву на перспективу

Показник	Питома активність, Бк/л	Відхилення макс., Бк/л	Відхилення мін., Бк/л	Середнє відхилення, Бк/л	Показник реперної точки, Бк/л
№	Y	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
21	551,314	91,2	47,6	5,9	56,5
22	25,1854	5,2	3,8	5,9	44,1
23	274,798	51,3	23,5	4,2	49,5
24	36,7312	15,7	4,1	4,2	39,1

Для прогнозних розрахунків з метою отримання певного інтервалу, в якому можуть перебувати показники, взяті максимально і мінімально отримані відхилення за роками досліджень, а також середні показники, отримані у останні роки досліджень. На цій основі змодельовані дані можна співставити з даними реальних замірів за 2014 р. та максимальними і мінімальними значеннями питомої активності тритію у талій воді снігового покриву за весь період спостережень (табл. 6, рис. 1).

Таблиця 6 – Порівняння змодельованих показників з реальними даними

Показники	Прогноз, Бк/л	Факт 2014, Бк/л	Факт макс/мін, Бк/л
макс. 1	551,3	249,5	1431,2
макс. 2	274,8	128,7	634,8
мін. 1	25,2	-	15,8
мін. 2	36,7	-	64,3

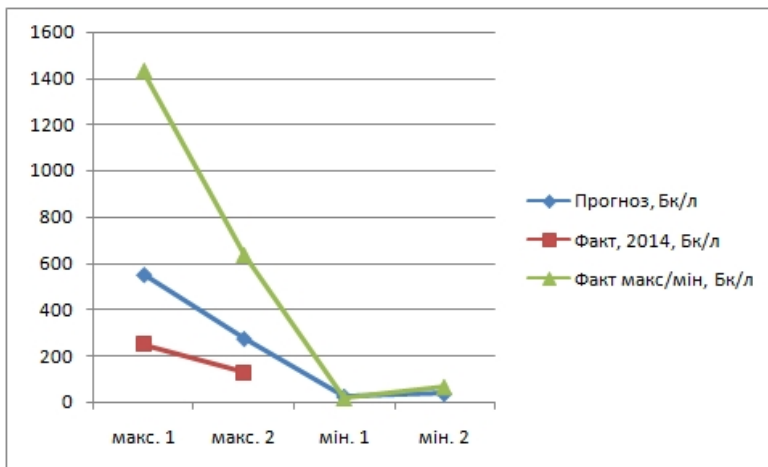


Рисунок 1 – Порівняння змодельованих показників з реальними даними питомої активності тритію у талій воді снігового покриву за весь період спостережень

Як видно з таблиці, прогнозоване максимальне значення питомої активності тритію у талій воді снігового покриву у 274,8 Бк/л дуже близьке до максимального показника 2014 р. у 249,5 Бк/л. Тобто, розрахунок питомої активності тритію у талій воді снігового покриву за максимальними та мінімальними значеннями вимірів минулих років дозволив отримати відносно точний прогноз, що підтверджено реальними даними. Слід зазначити, що фактичний показник 2014 р. у 128,7 Бк/л не перевищує показники минулих років і обумовлений активною роботою тритієвої лабораторії.

Розташування корпусів тритієвої лабораторії та санітарно-захисна зона дослідницького реактора, де відбувається постійний моніторинг стану навколишнього середовища та була здійснена переважна частина замірів показників з 2004 р. по 2014 р., що використані в роботі (коло, яке окреслює зону радіусом 300 м), представлені на карті (рис. 2).

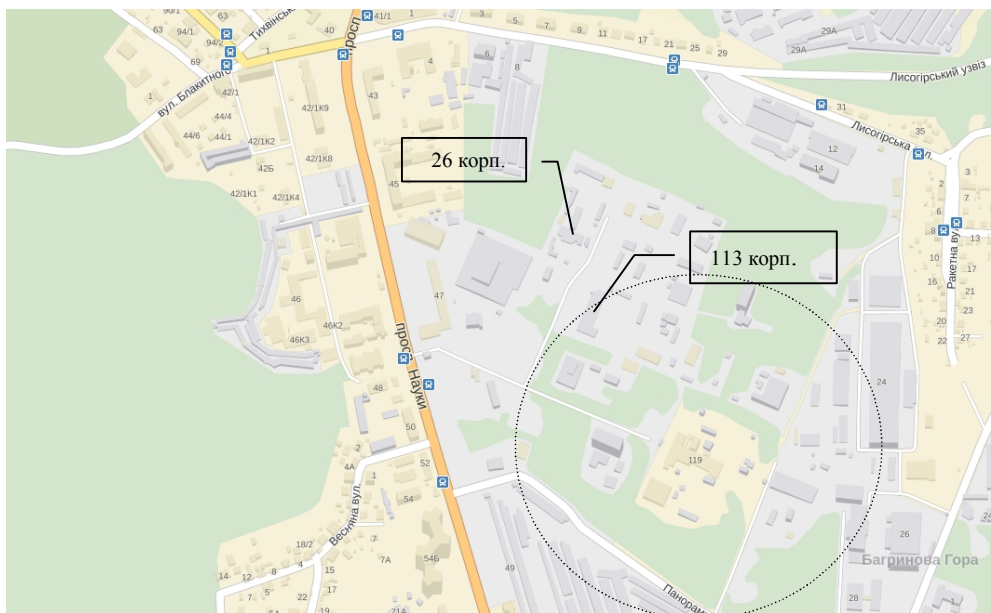


Рисунок 2 – Зони моніторингу стану навколишнього середовища

Таким чином, навіть за великих значень зафіксованих показників, радіоактивний ізотоп тритію осідає в межах санітарно-захисної зони, яка була встановлена саме з врахуванням максимально можливих показників викидів під час роботи дослідницького ядерного реактора і лабораторій Інституту ядерних досліджень НАН України.

Висновки

За підсумками викладеного в статті можна зробити наступні висновки:

1) спостерігаються досить великі розбіжності в значеннях загальної питомої активності тритію в різних дослідних зразках (особливо в скидних водах з води по вул. Лисогірській), що можна пояснити їхньою залежністю від виробничої діяльності тритієвих лабораторій. Проте, усі отримані результати вимірювань радіоактивного забруднення за тритієм в основному є

нижчими за допустимі концентрації для населення (категорія В). За межами Інституту ядерних досліджень НАН України та санітарно-захисної зони всі показники знаходяться в межах норми;

2) прогнозоване максимальне значення питомої активності тритію у талій воді снігового покриву у 274,8 Бк/л дуже близьке до максимального показника 2014 р. у 249,5 Бк/л. Тобто, розрахунок питомої активності тритію у талій воді снігового покриву за максимальними та мінімальними значеннями вимірів минулих років дозволив отримати відносно точний прогноз, що підтверджено реальними даними. Слід зазначити, що фактичний показник 2014 р. у 128,7 Бк/л не перевищує показники минулих років і обумовлений роботою тритієвої лабораторії;

3) підтверджено, що навіть за великих значень зафіксованих показників радіоактивний ізотоп тритію осідає в межах санітарно-захисної зони, яка була встановлена саме з врахуванням максимально можливих показників викидів під час роботи дослідницького ядерного реактора і лабораторій Інституту ядерних досліджень НАН України. Це дозволяє на прикладі міграції ізотопу тритію довести безпечність дослідницького ядерного реактора і лабораторій ІЯД НАН України за умов непорушення санітарно-захисної зони. Будь-яка забудова санітарно-захисної зони висотними спорудами, кардинальна зміна ландшафту території, що оточує ІЯД НАН України, призведе до створення штучних бар'єрів та накопичення радіонуклідів через порушення циклу природної нейтралізації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Радіаційні та ядерні технології в Інституті ядерних досліджень НАН України : монографія / І.М. Вишневецький, Г.П. Гайдар, О.В. Коваленко та ін.; НАН України, Ін-т ядерних досліджень. – К.: Ін-т ядерних досліджень, 2014. – 176 с.
2. Борислав Береза. Персональна сторінка facebook. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.facebook.com/borislav.bereza/posts/1151545268204911>.
3. Беспредел застройщиков: Киеву угрожает взрыв ядерного реактора. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.facenews.ua/articles/2015/275581/>.
4. Кабмин заинтересовался стройкой возле ядерного реактора в Киеве [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://apostrophe.com.ua/news/society/kyiv/2015-06-26/kabmin-zainteresovalsya-stroykoy-vozle-yadernogo-reaktora-v-kyeve/27918>.
5. Дом у ядерного реактора [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://society.lb.ua/life/2015/03/06/297819_dom_yadernogo_reaktora.html.
6. Пристер Б.С. Проблемы сельскохозяйственной радиоекологии и радиобиологии при загрязнении окружающей среды молодой смесью продуктов ядерного деления : монография / Борис Самуилович Пристер; И.о. НАН Украины. Ин-т проблем безопасности атомных электростанций; Предисл. Р.М. Алексахин. – Чернобыль : Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2008.– 320 с.
7. Коваленко Г.Д., Седнев В.А., Турбаєвський В.В. Накопичення і міграція тритію в районах розташування АЕС з реакторами ВВЕР // Ядерна і радіаційна безпека. – 2004. – №2. – С. 47–53.
8. Коваленко Г.Д., Турбаєвський В.В. Деякі питання моделювання розповсюдження тритію в ґрунтових водах // Ядерні й радіаційні технології – 2004 – т. 4, №3. – С. 46–52.
9. Долін В.В., Пушкар'єв О.В., Шраменко І.Ф. та ін. Тритій у біосфері. – К.: Науково-виробниче підприємство «Видавництво «Наукова думка» НАН України», 2012. – 224 с.

10. Тришин В.В., Сваричевська О.В., Павленко І.О., Дзятковська Н.М., Саженок А.Д., Кузьміна А.Й. Радіаційний моніторинг об'єктів навколишнього природного середовища в зоні впливу дослідницького ядерного реактора ВВР-М ІЯД НАН України / Ядерна фізика та енергетика. – т. 11, № 2. – 2010. – С. 165–168.
11. Сваричевська О.В., Кузьміна А.Й., Бекірова Г.О., Левчик О.І., Святун О.В. Радіаційний моніторинг об'єктів навколишнього природного середовища в зоні впливу дослідницького реактора ВВР-М і тритієвих лабораторій ІЯД НАН України (1995–2000 рр.) / Збірник наукових праць Інституту ядерних досліджень. – №1 (7). – 2002. – С. 107–111.
12. Кряжич О.О., Коваленко О.В. Застосування тризначної логіки в алгоритмах управління радіаційно небезпечними об'єктами / Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи): праці міжнар. наук.-практ. конф., 12–15 травня 2015 р., Київ-Черкаси / М-во освіти і науки України, Київ. нац. ун-т імені Тараса Шевченка та [ін.]; наук. ред. В.Є. Снитюк. – Черкаси: видавець Чабаненко Ю., 2015. – С. 357–358.

Стаття надійшла до редакції 17.04.2015