

РОЗДІЛ VII. ТЕХНОЛОГІЇ ОХОРОНИ ПРАЦІ ТА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

УДК 53.043+004.942

Олександр Коваленко, Ольга Кряжич

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ МІГРАЦІЇ ТРИТІУ ЗА ЛАНЦЮГОМ «ТАЛА ВОДА СНІГОВОГО ПОКРИВУ – РОСЛИНА»

Александр Коваленко, Ольга Кряжич

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ МИГРАЦИИ ТРИТИЯ ПО ЦЕПОЧКЕ «ТАЛАЯ ВОДА СНЕГОВОГО ПОКРОВА – РАСТЕНИЕ»

Oleksandr Kovalenko, Olga Kryazhych

RESEARCH OF DEPENDENCIES OF MIGRATION OF TRITIUM IN THE CHAIN “MELTING WATER OF THE SNOW COVER – PLANT”

Наведено результати досліджень залежностей міграції радіонукліда водню – тритію. Дослідження проведені за ланцюгом «тала вода снігового покриву – рослина». Виявлено, що питома активність тритію у воді наростає поліноміально. Також виявлено, що різна активність тритію у складі вільної води рослин може бути обумовлена процесами життєдіяльності рослин з урахуванням погодних умов, складом ґрунту, на якому знаходиться рослина. Зроблені висновки з урахуванням отриманих результатів для прогнозування можливих наслідків викидів техногенного тритію в результаті аварійних ситуацій на атомних електростанціях та підприємствах ядерного синтезу.

Ключові слова: тритій, міграція, радіонуклід, питома активність, поліном.

Рис.: 3. Табл.: 3. Бібл.: 7.

Приведены результаты исследований зависимостей миграции радионуклида водорода – трития. Исследования проведены по цепочке «таялая вода снежного покрова – растение». Обнаружено, что удельная активность трития в воде нарастает полиномиально. Также выявлено, что различная активность трития в составе свободной воды растений может быть обусловлена процессами жизнедеятельности растений с учетом погодных условий, составом почвы, на котором находится растение. Сделаны выводы с обозначением практической ценности полученных результатов для прогнозирования возможных последствий выбросов техногенного трития в результате аварийных ситуаций на атомных электростанциях и предприятиях ядерного синтеза.

Ключевые слова: тритий, миграция, радионуклид, удельная активность, полином.

Рис.: 3. Табл.: 3. Библ.: 7.

The paper presents the results of investigations of dependencies of the migration of the radionuclide hydrogen – tritium. Studies conducted in the chain “the melting water of the snow cover – a plant”. Discovered that the specific activity of tritium in the water of the polynomial increases. Also revealed that the different activity of tritium in the composition of the free water of plants may be due to weather conditions and soil composition. The findings with the marking of the practical value of the results obtained for the prediction of possible consequences of anthropogenic emissions of tritium.

Key words: tritium, migration, radionuclide, specific activity, polynomial.

Fig.: 3. Tabl.: 3. Bibl.: 7.

Постановка проблеми. Під час поїздки на Чорнобильську АЕС у рамках заходів Першої міжнародної конференції «Проблеми виведення з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища» INUDECО'16 (м. Славутич, 25–27 квітня 2016 р.) було зазначено, що новий конфайнмент (НБК, Арка) забезпечить надійний захист 4-го енергоблока АЕС від випромінення та пилу, що виникає в результаті поступової руйнації об'єкта «Укриття», що створював захист з моменту аварії. Проте від радіонуклідів, що потрапили у навколишнє середовище під час та після аварії, надійного захисту поки що немає. І однією з причин такого стану є відсутність досліджень щодо особливостей міграції ряду радіонуклідів, серед яких, зокрема, є радіонуклід водню – тритій.

Після аварії на Чорнобильській АЕС у навколишнє середовище потрапило близько 10^{14} Бк тритію. І нині більшість водойм зони відчуження мають понаднормові показники вмісту тритію. Небезпека впливу цього радіонукліда на живі істоти полягає в тому, що організм визначає тритій, як звичайний атом водню. Унаслідок малої енергії випромінювання тритій не призводить до зовнішнього випромінювання, а надходить за харчовими ланцюгами з їжею та водою. Тритій, що потрапляє усередину клітин організму з молекулами води, спричиняє більші ушкодження, ніж зовнішнє опромінення через те, що продукти роз-

паду стають джерелами внутрішнього випромінювання, призводять до ушкодження органічних комплексів та ДНК, порушення кровотворення та виникнення злоякісних утворень.

Вітчизняні і закордонні дослідники мають відносно незначні досягнення у зазначеній сфері: радіобіологічні властивості тритію вивчені недостатньо, оцінки концентрацій тритію у питній воді за даними та методиками ВООЗ, ЕАТОМ та МАГАТЕ, а також науковими публікаціями різних країн світу є протилежними та суперечливими, існують деякі моделі міграції тритію у воді, проте не представлено моделей, що описують міграцію у системі «вода – ґрунт – рослина», «повітря – вода», «рослина – тварина» та навколишньому середовищі загалом.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Існує багато наукових праць, в яких представлені результати статистичних спостережень забруднення тритієм. Найбільш відомою в цій сфері є робота доктора А. В. Клемента з вимірами за період у 40 років [1], а також робота дослідника Грега Джонса щодо забезпечення безпеки від тритію з водяних реакторів [2]. Серед робіт російських дослідників можна зазначити за досліджуваною темою працю Г. Романова [3]. Найбільш відомий дослідник з міграції продуктів ядерного синтезу в Україні – доктор біологічних наук Б. С. Прістер з Інституту проблем безпеки АЕС НАН України [4]. 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 [5–6]. Найбільш цікавою за зазначеною темою є нова робота, в якій представлена статистика й аналіз руху тритію у біосфері [7] за авторства провідних учених-представників різних інститутів Національної академії наук України.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Проблема дослідження міграції тритію у навколишньому середовищі полягає у фізико-хімічних особливостях водню, який знаходиться у біосфері здебільшого у вигляді сполук. Загальна ідея підходу дослідження міграції тритію за ланцюгом «тала вода снігового покриву – рослина» полягає в аналізі закономірності розподілу тритію в молекулах води у соку беріз після початку танення снігового покриву з урахуванням температурного режиму та структури ґрунту.

Мета статті. Метою роботи є представлення математичних залежностей міграції тритію за ланцюгом «тала вода снігового покриву – рослина» на основі оброблення спостережень наявності тритію у соку беріз за 10 років та виявлення особливостей міграції тритію у талій воді від температури повітря і складу ґрунту.

Виклад основного матеріалу. 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 заміщувати атоми водню на тритій.

Накопичення і міграція тритію в навколишньому середовищі визначається часом перебування, місцем знаходження й інтенсивністю обміну в повітряних масах, а також концентрацією тритію у стратосфері протягом обмінних процесів. Влітку над землею концентрація тритію нижче від 2 км підвищується через випаровування весняних і зимових атмосферних опадів, а над морями на ту ж відстань – зменшується через поглинання тритію водою. Кругообіг атмосферної води через повітряний океанічний обмін відбувається дуже швидко, тому внаслідок швидкого обміну ізотопів між краплями води й паром, дощі переносять тритій у нижні шари тропосфери [7].

Враховуючи, що ядро тритію нестабільне, то абсолютна інтенсивність бета-випромінювання дорівнює 100 %. Основну частину своєї енергії бета-електрони тритію витрачають на взаємодію з електронними оболонками атомів речовини середовища, в якому вони рухаються. Ізотопний склад водню і кисню, що у процесі фотосинтезу переходять до вуглеводів рослин із води, практично повністю визначається ізотопним

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

складом води. Ізотопи водню фракціонуються 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, що доведено багатьма спостереженнями.

Процес трансформації водної форми тритію НТО в «органічно зв'язаний» ізотоп тритію ^3H підпорядкований дискримінації ^3H щодо ^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 у навколишнє середовище питомі активності ^3H у складі вільної води й «органічно зв'язаного» ^3H наростають у часі, як зазначено у [7], ймовірно, експоненціально.

Зміни в часі (зростання або зниження) концентрації тритію у разі потрапляння його в навколишнє середовище разом з водою можна довести за результатами спостережень.

Дослідження проводилися на Багриновій горі, яка обмежена проспектом Науки та вулицями Лисогірська, Ракетна та Панорамна. Грунт території сформований на лісових відкладах з великою присутністю глини та глиноземів. Структура – пориста, багата вимінами та кавернами. Рослинне покриття – широколистяні дерева з елементами підліску. Трав'яний ярус – характерний для лісових територій.

Підготовка зразків та вимірювання вмісту в них радіонуклідів проводилася в лабораторії Центру екологічних проблем атомної енергетики (ЦЕПАЕ). Апаратура, що використовується для вимірювань, атестована та проходить регулярні планові перевірки. Похибки вимірювань – у межах норми.

У табл. 1 наведено результати вимірів питомої активності тритію у скидних водах за період з лютого по листопад 2014 року. Проби відбиралися у точках виміру, встановлених для підприємства, що використовує або викидає тритій у процесі виробничої діяльності.

Таблиця 1

Питома активність тритію у скидних водах у 2014 р., Бк/л

№ п/п	Дата відбору	Вода (500 м від точки викиду тритію)	Погодні умови
1	06.02	321,1 ± 11,5	температура 0 °С, вітер 6 м/с, південний, вологість повітря 71 %, хмарно
2	03.03	223,4 ± 12,3	температура +3 °С, вітер 4 м/с, північно-східний, вологість повітря 89 %, мокрий сніг
3	01.04	590,9 ± 16,2	температура +7 °С, вітер 7 м/с, північний, вологість повітря 34 %, ясно
4	06.05	400,9 ± 12	температура +12 °С, вітер 7 м/с, західний, вологість повітря 44 %, ясно
5	06.06	78,1 ± 4,0	температура +26 °С, вітер 5 м/с, північно-західний, вологість повітря 36 %, ясно
6	27.06	70,9 ± 4,0	температура +21 °С, вітер 6 м/с, північно-західний, вологість повітря 65 %, дощ
7	30.07	88,4 ± 4,4	температура +33 °С, вітер 4 м/с, південно-східний, вологість повітря 23 %, ясно
8	03.10	156,1 ± 6,1	температура +15 °С, вітер 2 м/с, північно-східний, вологість повітря 37 %, ясно

Як можна помітити з табл. 1, активність тритію зростає в період танення снігу та навесні й восени, у дощовий період, що обумовлено додатковим проникненням у навколишнє середовище вод, що утримують НТО, з атмосфери та з поверхні ґрунту і рослин.

Тобто наявні нестабільні дані щодо зростання й убавання тритію у скидних водах залежно від температури, пори року, вологості повітря. За кількістю максимальних та мінімальних величин знайдена четверта ступінь екстремуму, бо чітко прослідковуються три мінімуми і максимуми, що наведено на графіку (рис. 1).

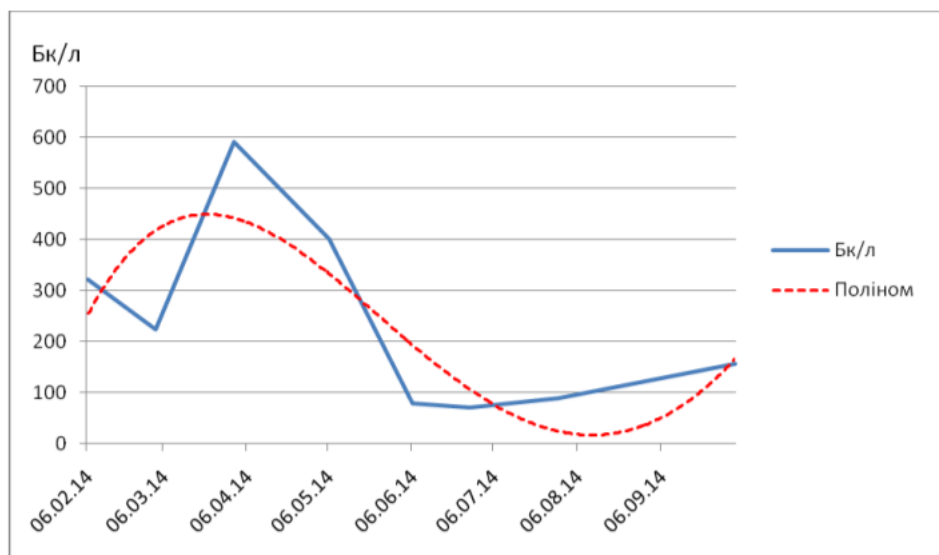


Рис. 1. Питома активність тритію у скидних водах у часі

Виходячи з рис. 1 можна зазначити, що спостерігається поліноміальна залежність змін питомої активності ^3H у часі при його надходженні у навколишнє середовище, яка може бути представлена таким рівнянням:

$$y = -7 \cdot 10^7 x^4 + 0,1161x^3 - 7299,7x^2 + 0,8x + 12.$$

Величина достовірності апроксимації $R^2 = 0,635$, тобто наближується до 1, що вказує на відповідність моделі наявним даним.

Така ж сама поліноміальна залежність, але вже шостого ступеня, спостерігається у змінах питомої активності тритію у талій воді снігового покриву (табл. 2, рис. 2).

Таблиця 2

Питома активність тритію у талій воді снігового покриву у 2014 р.

Дата відбору зразків 10.02.2014 р.

№ точки відбору	Питома активність, Бк/л	№ точки відбору	Питома активність, Бк/л
1	136,4 ± 5,9	10	185,8 ± 7,2
2	138,9 ± 6,0	11	144,2 ± 7,6
3	145,8 ± 6,0	12	210,1 ± 7,8
4	154,4 ± 6,0	13	220,9 ± 8,2
5	156,4 ± 5,9	14	249,5 ± 8,2
6	170,1 ± 6,6	15	230,7 ± 8,5
7	150,6 ± 6,2	16	159,5 ± 6,5
8	163,6 ± 6,5	17	183,3 ± 7,3
9	128,7 ± 5,5		
Реперна точка (відстань – 30 км) – 74,5 ± 5,2			

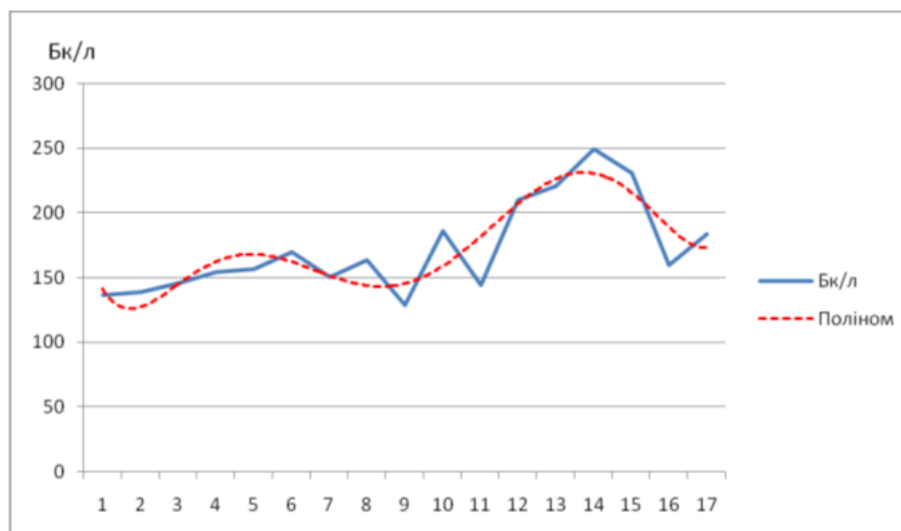


Рис. 2. Питома активність тритію у талій воді снігового покриву

Виміри питомої активності тритію у талій воді проводилися за вісім днів після виміру питомої активності у скидних водах у 2014 році. Погодні умови на час досліджень талої води майже не змінилася. Так, температура вдень, 10 лютого 2014 року, становила $+1^{\circ}\text{C}$, вітер -2 м/с, південно-східний, вологість повітря 100 %, хмарно. До дня відбору проб погодні умови були такими: вночі температура не опускалася нижче 0°C , вдень – становила до $+4^{\circ}\text{C}$. У перші дні лютого 2014 року температура була морозною, але вже 5 лютого вдень відбулося потепління ($+5^{\circ}\text{C}$) з пониженням вночі (-8°C). З 7 лютого почалося потепління і температура вдень коливалася в межах $(1-5)^{\circ}\text{C}$ тепла. Тобто на дату відбору розпочалося таяння снігу.

Сімнадцять точок дослідження – точки відбору зразків у межах 300 м санітарно-захисної зони підприємства, що використовує у своїй виробничій діяльності тритій. Ці точки відповідають характеристикам місцевості, що досліджується – на підвищенні, у низинах, місцях, де є активне вивітріння, освітлення чи затемнення від сонця, під деревами, на відкритій місцевості. Виявлена поліноміальна залежність дозволяє припустити, що так само буде відбуватися і проникнення тритію у ґрунт з наступним рухом у соку дерев.

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 деревині процес «очищення» відбувається повільніше, що можна пояснити накопиченням тритію у тканинах дерев в обмінній формі, що підтверджується і відповідними дослідженнями, про які буде зазначено нижче.

У ґрунті тритій знаходиться в двох основних формах. Основна його частина міститься у вільній воді ґрунту (НГО) 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 [7]. Після видалення ґрунтової вологи (вільна вода) деяка частина тритію залишається у ґрунті в іонообмінній та сорбованій формах.

Тобто тритій, як нуклід водню, характеризується високою міграційною здатністю у воді, що обумовлює його активність у обмінних процесах живих організмів та переміщення в системі «вода – рослина».

Корені та інші підземні органи відносно активно збагачуються ^3H . Розподіл органічно зв'язаного тритію (ОЗТ) у тканинах й органах рослин неоднорідний і визначається біохімічними характеристиками структур. 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.

У [7] зазначається, що 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 у системі атмосфера-рослина-ґрунт. Ґрунтуючись на даних досліджень за табл. 3, можна зазначити, що твердження [7] є базовим, проте різна активність тритію у складі вільної води рослин може бути обумовлена процесами життєдіяльності рослин за різних погодних умов, а також складом ґрунту, на якому знаходиться рослина, що досліджується.

Так, у табл. 3 наведені максимальні значення питомої активності тритію за 10 років у талій воді снігового покриву в санітарній зоні підприємства, що використовує тритій у виробничій діяльності, та за однією точкою замірів березового соку у дерев, що розташовані в межах санітарної зони.

Таблиця 3

Питома активність тритію у талій воді снігового покриву та соку берези, Бк/л

№	Рік	Тала вода снігового покриву	Березовий сік			
		Питома активність	Питома активність	Дата відбору	Погодні умови на час відбору (9:00)	Реперна точка, 20 км
1	2005	634,8 ± 51,3	665,4 ± 50,2	06.04	+16 °С, ясно, вітер південно-західний, 3 м/с, атм. тиск 751 мм, вологість повітря 28 %	58,2 ± 16,4
2	2006	1393,0 ± 52,5	781,3 ± 36,9	06.04	+8 °С, димка, вітер південно-східний, 3 м/с, атм. тиск 739 мм, вологість повітря 92 %	52,4 ± 6,4
3	2007	1267,0 ± 87,6	126,03 ± 20,6	02.04	+9 °С, ясно, вітер північно-західний, 5 м/с, атм. тиск 744 мм, вологість повітря 49 %	43,4 ± 6,4
4	2008	748,0 ± 40,3	1072,0 ± 48,0	09.04	+13 °С, змінна хмарність, вітер південно-східний, 3 м/с, атм. тиск 741 мм, вологість повітря 82 %	93,4 ± 2,3
5	2009	208,4 ± 11,9	160,4 ± 10,4	23.04	+12 °С, ясно, вітер східний, 2 м/с, атм. тиск 748 мм, вологість повітря 23 %	54,2 ± 2,6
6	2010	143 ± 6	224 ± 15	06.04	+13 °С, змінна хмарність, вітер південно-східний, 2 м/с, атм. тиск 750 мм, вологість повітря 56 %	61 ± 3
7	2011	169,5 ± 6,8	277,4 ± 14,7	06.04	+8 °С, хмарно, вітер північний, 4 м/с, атм. тиск 747 мм, вологість повітря 75 %	102,5 ± 6,3
8	2012	131,0 ± 5,9	104,0 ± 5,8	03.04	+5 °С, змінна хмарність, вітер західний, 6 м/с, атм. тиск 743 мм, вологість повітря 70 %	102,5 ± 6,3
9	2013	103,5 ± 4,9	183,9 ± 14,2	15.04	+6 °С, суцільна хмарність, вітер північний, 5 м/с, атм. тиск 755 мм, вологість повітря 87 %	70,5 ± 6,3
10	2014	249,5 ± 8,2	124,3 ± 5,5	26.03	+11 °С, ясно, вітер південно-східний, 35 м/с, атм. тиск 744 мм, вологість повітря 62 %	55,8 ± 3,3

Максимальні значення дають можливість дослідити загальний рівень забруднення території тритієм. Одна точка дослідження (те ж саме дерево) показує навантаження забруднення на окрему рослину. Крім того, дослідження того самого об'єкта (дерева) протягом 10 років дозволяє розглянути процес міграції тритію за водообміном рослини. На рис. 3 наведено питому активність тритію у талій воді снігового покриву та соку берези за 10 років досліджень, а також графіки поліноміальних залежностей показників.

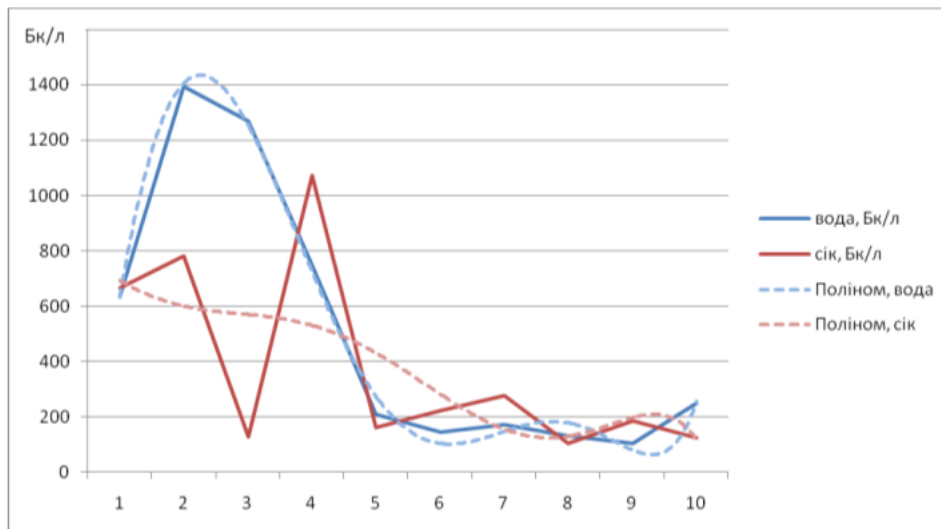


Рис. 3. Питому активність тритію у талій воді снігового покриву та соку берези за 10 років

Пік 2005–2007 років означає активну роботу підприємства з викидами небезпечної речовини в навколишнє середовище. Проте стрибок питомої активності ^3H в соку досліджуваної берези спостерігається у 2008 році, коли питома активність ^3H у талій воді снігового покриву різко зменшується. Далі йде стійке чергування показників – зростання питомої активності тритію у соку берези спостерігається після зафіксованих збільшених показників ^3H у попередньому році. Наведені графіки також ілюструють поліноміальну залежність змін питомої активності тритію.

Рівняння поліноміальної залежності за показниками талої води снігового покриву:

$$y = 0,199x^6 - 5,5598x^5 + 51,91x^4 - 136,55x^3 - 500,14x^2 + 2610,9x - 1388,8.$$

Коефіцієнт апроксимації: $R^2 = 0,9954$.

Рівняння за показниками питомої активності тритію у соку берези:

$$y = -0,0643x^6 + 1,705x^5 - 15,717x^4 + 56,944x^3 - 51,589x^2 - 149,79x + 853,11.$$

Коефіцієнт апроксимації: $R^2 = 0,4124$. Низький показник коефіцієнта апроксимації обумовлений великими стрибками показника питомої активності тритію у соку берези з абсолютного мінімуму до абсолютного максимуму. Це теж дозволяє зробити певні висновки.

Зокрема, у роботі [7] зазначається, що виведення ^3H з рослин визначається процесом водообміну. Основний період напіввиведення, характерний для 90 % виведення водної форми тритію НГО, практично не залежить від кліматичних умов і коливається від декількох годин до (10–20) діб.

Проте з графіків (рис. 3) чітко видно, що частина тритію, що в лютому була визначена у талій воді снігового покриву, і яка, за логікою [7], повинна була в березні–квітні підвищити питому активність ^3H в соку берези, не бере участі у процесі водообміну. Проте на наступний рік питома активність тритію у соку берези іноді доволі різко зростає, хоча показники присутності ^3H у талій воді – зменшуються.

Зазначене може бути обумовлено певними факторами.

По-перше, у роки, коли питома активність тритію у соку беріз зменшувалася, температура повітря у період досліджень була більшою. Тобто у дерев спостерігався більш активний період руху соку. Через це на дату дослідження питома активність тритію у соку берези могла вже зменшитися.

По-друге, тритій, що потрапляв з талою водою снігового покриву до глинистого ґрунту, міг брати участь у заміщенні атомів водню деяких глинистих мінералів (про можливість такої реакції зазначено у [7]). Коливання температури уповільнювали (у разі пониження) чи прискорювали (у разі підвищення) такий обмін, як звичайної хімічної реакції з присутністю атому водню. Тому частина ^3H з талих вод акумулювалася в ґрунті.

По-третє, наведені дані вказують на різке зростання питомої активності тритію в навколишньому середовищі наприкінці зими – початку весни. Протягом року поліноміальна залежність змін питомої активності тритію показує стійке циклічне зменшення питомої активності чотири рази за мінімумом і максимумом. Це дозволяє зробити припущення, що період накопичення та виведення тритію у рослин все ж має залежність від кліматичних умов, а також, вірогідно, від складу ґрунту, на якому росте рослина.

Висновки і пропозиції. У статті представлені математичні залежності міграції тритію за ланцюгом «тала вода снігового покриву – рослина» на основі оброблення спостережень наявності тритію у соку беріз за 10 років та виявлення особливостей міграції тритію через талу воду снігового покриву до соку рослин від температури повітря і складу ґрунту.

Отримано такі результати:

1) за постійного надходження тритію в навколишнє середовище питомі активності ^3H у складі вільної води й «органічно зв'язаного» ^3H нарастають у часі поліноміально;

2) доведено базове твердження, що питома 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 у системі атмосфера – рослина – ґрунт;

3) виявлено, що різна активність тритію у складі вільної води рослин може бути обумовлена процесами життєдіяльності рослин з урахуванням погодних умов, складом ґрунту, на якому знаходиться рослина.

Результати знайдених математичних залежностей міграції тритію за ланцюгом «тала вода снігового покриву – рослина» можуть бути використані для прогнозування можливих наслідків викидів техногенного тритію в результаті аварійних ситуацій на атомних електростанціях та підприємствах ядерного синтезу.

Список використаних джерел

1. *Klement A.W., Jr., et al. Estimates of Ionising Radiation Doses in the United States 1960–2000.* – EPA, 1972, 67 p.

2. *Jones G. Tritium Issues in Commercial Pressurized Water Reactors. Fusion Science and Technology* 54 (2): Pp. 329–332.

3. *Романов Г. Н. Поведение в окружающей среде и биологическое действие трития / Г. Н. Романов // Проблемы радиозкологии. – М. : ВИНТИ, 1983. – Т. 4. – С. 6–31.*

4. *Пристер Б. С. Проблемы сельскохозяйственной радиозкологии и радиобиологии при загрязнении окружающей среды молодой смесью продуктов ядерного деления : монография / Борис Самуилович Пристер ; предисл. Р. М. Алексахин. – Чернобыль : Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2008. – 320 с.*

5. *Коваленко Г. Д. Накопичення і міграція тритію в районах розташування АЕС з реакторами ВВЕР / Г. Д. Коваленко, В. А. Седнев, В. В. Турбаєвський // Ядерна і радіаційна безпека. – 2004. – № 2. – С. 47–53.*

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

7. *Тритій у біосфері* / В. В. Долін, О. В. Пушкар'єв, І. Ф. Шраменко та ін. – К. : Наукова думка, 2012. – 224 с.

References

1. Klement A.W., Jr. et al. *Estimates of Ionising Radiation Doses in the United States 1960–2000*. EPA, 1972, 67 p.
2. Jones G. *Tritium Issues in Commercial Pressurized Water Reactors*. Fusion Science and Technology 54 (2): Pp. 329–332.
3. Romanov, G.N. (1983). Povedenie v okruzhaiushchei srede i biologicheskoe deistvie tritiia [The environmental behavior and biological effect of tritium]. *Problemy radioekologii – Problems of radioecology*, vol. 4. Moscow: VINITI (in Russian).
4. Prister, B.S. (2008). *Problemy selskokhoziaistvennoi radioekologii i radiobiologii pri zagriaznenii okruzhaiushchei sredy molodoi smesiu produktov iadernogo deleniia [Problems of agricultural radioecology and radiobiology when environmental pollution is a young mixture of the products of nuclear fission]*. Chernobyl: In-t problem bezopasnosti AES NAN Ukrainy (in Russian).
5. Kovalenko, H.D., Sedniev, V.A., Turbaievskiy, V.V. (2004). Nakopychennia i mihratsiia trytiiu v raionakh rozstahuvannia AES z reaktoramy VVER [Accumulation and migration of tritium in the areas adjacent to nuclear power plants with VVER reactors]. *Yaderna i radiatsiina bezpeka – Nuclear & radiation safety*, no. 2, pp. 47–53 (in Ukrainian).
6. Kovalenko, H.D., Turbaievskiy, V.V. (2004). Deiaki pytannia modeliuvannia rozpovsiudzhennia trytiiu v gruntovykh vodakh [Some modeling distribution of tritium in groundwater]. *Yaderni y radiatsiini tekhnologii – Nuclear and Radiation Technology*, vol. 4, no. 3, pp. 46–52 (in Ukrainian).
7. Dolin, V.V., Pushkarov, O.V., Shramenko, I.F. et al. (2012). *Trytii u biosferi [Tritium in the biosphere]*. Kyiv: Naukova dumka (in Ukrainian).

Коваленко Олександр Васильович – кандидат технічних наук, в. о. завідувача відділом ядерної фізики, Інститут ядерних досліджень НАН України (просп. Науки, 47, м. Київ, 03680, Україна).

Коваленко Александр Васильевич – кандидат технических наук, и. о. заведующего отделом ядерной физики, Институт ядерных исследований НАН Украины (просп. Науки, 47, г. Киев, 03680, Украина).

Kovalenko Oleksandr – PhD in Technical Sciences, acting Head of the division of Nuclear Physics, Institute for Nuclear Research NAS Ukraine (47 Nauky Av., 03680 Kyiv, Ukraine).

E-mail: akovalenko@kinr.kiev.ua

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3406-8770>

Кряжич Ольга Олександрівна – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України (Чоколівський бульвар, 13, м. Київ, 03186, Україна).

Кряжич Ольга Александровна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт телекоммуникаций и глобального информационного пространства НАН Украины (Чоколовский бульвар, 13, г. Киев, 03186, Украина).

Kryazhych Olga – PhD in Technical Sciences, Senior researcher, Institute of Telecommunications and Global Information Space of NAS of Ukraine (13 Chokolivskiy bulv., 03186 Kyiv, Ukraine).

E-mail: economconsult@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1845-5014>