

МАТЕМАТИЧНІ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ МОДЕЛІ В ЕКОНОМІЦІ

УДК 539.1.04; 550.35; 004.942

О.В. КОВАЛЕНКО, О.О. КРЯЖИЧ

РОЗПОДІЛ ТРИТІЮ В ОРГАНІЧНІЙ РЕЧОВИНІ РОСЛИН НА ПРИКЛАДІ КУЛЬБАБИ ЛІКАРСЬКОЇ

***Анотація.** У статті наведені попередні результати дослідження міграції радіоізоотопу водню – тритію – в органічній речовині рослин. Робота виконана на прикладі кульбаби лікарської. Проведено ряд вимірів питомої активності тритію у водному екстракті рослин. Виявлені залежності. Описано первинний механізм міграції тритію в органічній речовині. Означені подальші напрями дослідження за темою.*

***Ключові слова:** тритій, міграція, спосіб, поліноміальна залежність.*

Вступ

Перспективи використання термоядерного синтезу та підвищення безпеки роботи АЕС у світі окреслили одну з актуальних проблем: дослідження фізико-хімічних особливостей самого малодослідженого радіоізоотопу водню – тритію.

Важливість тематики даного дослідження обумовлена тим, що тритій відноситься до числа найважливіших радіонуклідів дозоутворення, які характеризують та визначають радіаційний фон біля підприємств атомної енергетики та ядерного синтезу. При цьому він має велику міграційну здатність, процеси і особливості якої досі є недостатньо розкритими, як і, власне, фізико-хімічні особливості такої міграції за ланцюгами «вода – рослина», «вода – живий організм».

Враховуючи зазначене, мету роботи можна окреслити як дослідження розподілу тритію в органічній речовині рослин з виявленням фізико-хімічних особливостей цього процесу. Робота виконана на прикладі кульбаби лікарської – однієї з найбільш розповсюджених рослин території як України, так і всієї планети.

Задачі роботи:

– обґрунтувати вибір кульбаби лікарської у якості об'єкта дослідження міграції тритію за ланцюгом «вода – рослина»;

– представити аналітичну обробку результатів досліджень з метою визначення деяких фізико-хімічних особливостей міграції тритію та первинного механізму міграції радіоізоотопу.

Слід зазначити, що існує ряд досліджень і публікацій щодо вивчення поведінки тритію в екосистемах. Так, можна назвати звіт ІАЕА [1], статтю канадського дослідника Р.М. Брауна [2], а також відому книгу російських вчених [3]. Проте більшість цих досліджень проводилася у 80–90 роках минулого століття, коли на тритій, з причини його відносно низькоенергетичного випромінювання та низької проникної здатності, суттєвої уваги не звертали.

З останніх робіт із зазначеної тематики можна вказати книгу українських дослідників «Тритій у біосфері» [4], де наведено результати досліджень останніх років щодо поведінки у біосфері радіоізоотопу водню, а також статтю канадських дослідників, в якій розглянуті деякі особливості міграції тритію в рослинному покриві та його збільшене накопичення в коренях, в порівнянні із зеленою масою рослин [5].

1. Постановка задачі

З травня по серпень 2016 року на території, де раніше активно проводилися роботи з тритієм, було зроблено понад 100 вимірів водних екстрактів різноманітних рослин з визначенням питомої активності тритію. Результати досліджень дали підставу стверджувати, що є рослини, які акумулюють у своїй органічній речовині тритій на певний період. Експериментальним шляхом було виявлено, що за умови взяття проб рослин, що розташовані одна від одної на відстані не більшій, ніж 1 м, у кульбаби лікарської (*Taraxacum officinale* Wigg.) питома активність тритію виявлялася вищою у порівнянні з екстрактами інших рослин.

Задача полягає в тому, щоб визначити, яким чином розподіляється тритій в різних біологічних частинах такої рослини, яка акумулює тритій, чи є такий розподіл суттєвим, які спостерігаються залежності та чи можна такі рослини означити у якості реперних при дослідженні забруднення територій тритієм.

2. Дослідження фізико-хімічних особливостей міграції тритію за ланцюгом «вода – рослина»

Накопичення і міграція тритію в навколишньому середовищі визначається часом перебування, місцем знаходження й інтенсивністю обміну у повітряних масах, а також концентрацією тритію у стратосфері протягом обмінних процесів. Відомо, що у тритію компонента бета-випромінювання одна і її абсолютна інтенсивність 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 в процесі фотосинтезу переходять до вуглеводів рослин із води, практично повністю визначається ізотопним 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 рядом спостережень [4].

У результаті досліджень [7] протягом 14 років змін в часі питомої активності тритію при потраплянні його в навколишнє середовище разом з водою були отримані поліноміальні залежності різних ступенів екстремуму [7].

Як було визначено, питома активність тритію у воді зростає в період танення снігу та навесні і восени, у дощовий період [6], що обумовлено додатковим проникненням у навколишнє середовище вод, що містять водні форми тритію (НТО), з атмосфери та з поверхні ґрунту і рослин. За кількістю максимальних та мінімальних даних вимірів питомої активності тритію з лютого по вересень 2014 року був визначений четвертий ступінь екстремуму, бо чітко прослідковуються три мінімуми і максимуми, що наведено на графіку (рис. 1).

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 наступним 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.

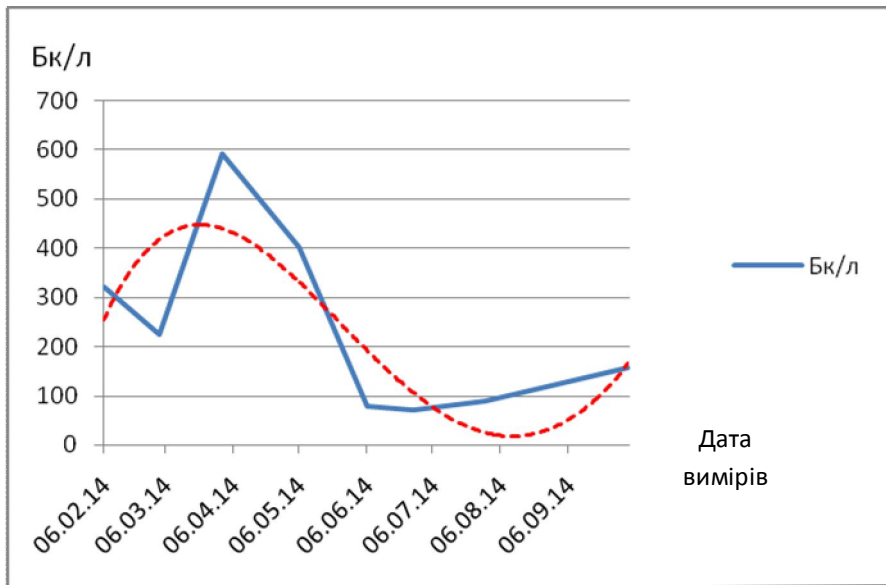


Рисунок 1 – Питома активність тритію у скидних водах у часі за місяцями (дані вимірів 2014 року)

Поліноміальні залежності зміни питомої активності тритію у талій воді снігового покриву та соку беріз дають можливість дослідити загальний рівень забруднення території радіоізопопом водню. Одна точка дослідження (для прикладу було взяте одне й те ж саме дерево) показує навантаження забруднення на окрему рослину. Крім того, дослідження одного ж і того об'єкта (дерева) протягом 10 років дозволяє розглянути процес міграції

тритію за водообміном рослини. На рис. 2 наведені питома активність тритію у талій воді снігового покриву та соку берези за 10 років досліджень, а також графіки поліноміальних залежностей показників.

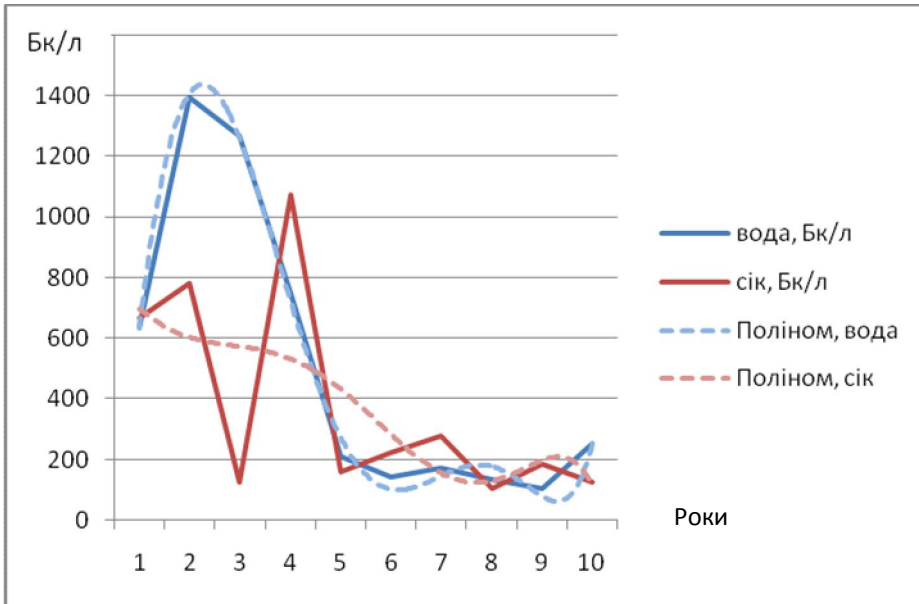


Рисунок 2 – Питома активність тритію у талій воді снігового покриву та соку берези за 10 років

Пік років, позначених точками 2 – 5, означає активну роботу підприємства з викидами небезпечної речовини в оточуюче середовище. Проте стрибок питомої активності ^3H в соку досліджуваної берези спостерігається у точці 4, 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.

Виникає питання – яким чином відбувається рух і акумулювання тритію, що проявляється зростанням питомої активності соку берез у наступному році?

Для відповіді на це питання на території підприємства, яке тривалий час працювало з тритієм, було проведене дослідження ряду рослин з використанням способу дослідження екологічного стану території при техногенному забрудненні. Результати однієї з таких проб від 28.05.16 наведені в табл. 1.

Представлені результати наведені за двома векторами досліджень зазначеної методики: перший (зона 1) – територія є санітарною зоною підприємства, що працює з тритієм, другий (зона 2) – за межами санітарної зони (для порівняння). Можна помітити, що питома активність тритію у кульбаби із зони 1 значно перевищує показники вмісту в інших рослинах, проби з яких взяті поряд з місцем забору означеної кульбаби.

Таблиця 1 – Виміри питомої активності тритію в рослинах

№	Місце збору	Назва рослини	Вміст Т, Бк/л	Частина рослини
1	Зона 1	Береза повисла (Bétula péndula)	10152,5	Зелене насіння
2	Зона 1	Конюшина (Trifolium)	12673,8	Квіти
3	Зона 1	Подорожник (Plantágo)	11606,8	Лист
4	Зона 1	Кульбаба (Taráxacum)	38444,4	Стеблина і відквітла квітка
5	Зона 2	Кульбаба (Taráxacum)	7967,24	Лист

Наступним етапом досліджень стало вимірювання питомої активності водного екстракту кульбаб, що ростуть на території дослідження за умови, що відомо, де пролягають межі санітарної зони підприємства, що працює з тритієм. Результати досліджень наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Дослідження питомої активності тритію в екстракті кульбаби лікарської

№	Місце збору у Зоні 1	Вміст Т, Бк/л
1	Газон, різнотрав'я	16728,7
2	Газон, різнотрав'я	9268,7
3	Дорога	12786,3
4	Дорога біля технічних споруд	12814,8
5	Дорога біля технічних споруд	10716,9
6	Дорога до виробничих корпусів	10285,0
7	Дорога до виробничих корпусів, межі зони 1	16547,8
8	Дорога, межі зони 1	16868,3
9	Дорога, межі зони 1	19815,1
10	Дорога, межі зони 1	15505,6
11	Дорога, межі зони 1	15209,2
12	Відкрита галявина між корпусами	49061,5
13	Відкрита галявина між корпусами	27449,9
14	Відкрита галявина між корпусами	41323,2
15	Відкрита галявина між корпусами	19367,5
16	Відкрита галявина між корпусами	46206,0
17	Відкрита галявина між корпусами	20984,6
18	Межі зони 1	14732,7
19	Відкрита галявина, різнотрав'я	24499,4
20	Відкрита галявина, різнотрав'я	26471,5

Проби за номерами 12, 14, 16 є точками збору в центрі санітарної зони підприємства, що працює з тритієм.

Тобто, виходячи з табл. 2, можна зазначити, що в межах санітарної зони питома активність водного екстракту кульбаби лікарської має показники значно вищі, ніж аналогічні виміри у відносно чистій зоні. Слід зазначити, що при цьому водні екстракти інших рослин з цих же точок збору проб не мали подібних високих показників.

Після проведення ряду вимірів, що підтвердили підвищений вміст тритію в екстракті кульбаби, була проведена деталізація вимірів та прийнята гіпотеза, що в різних частинах кульбаби вміст тритію є різним. Для перевірки цієї гіпотези було обрано декілька рослин із зон попереднього дослідження. Ці рослини були викопані цілими, майже однаковими за розміром і вагою (рис. 3).

З коренів, листя, квітконосних стрілок та квіток окремо, вагою приблизно по 2 г, були зроблені екстракти та перевірена їх питома активність. Результати наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Виміри питомої активності тритію в різних частинах кульбаби лікарської

№	Місце збору	Частина рослини, вміст Т, Бк/л			
		Корінь	Лист	Квітконосна стрілка	Квітка
1	Зона 2	10272,4	11981,7	14507,4	15747,7
2	Зона 1	10901,8	47294,9	50596,3	24444,7
3	Зона 1	13412,4	16286,7	14603,6	18137,7 ¹
4	Зона 1	14070,9	18762,0	14929,3	28670,4
5	Зона 1	21420,1 ²	16128,5	27597,9	17066,8

Згідно з виноскою 1 в табл. 3, рослини 3 і 4 росли в одній точці (дві рослини поряд). Це були майже однакові за розміром і вагою рослини кульбаби лікарської, з однією відмінністю: рослина 3 була вже розквітла, а 4 – ще в бутоні. Показники по кореню, листу і квітконосній стрілці не мають значних відмінностей.

Кульбаба 5 росла в асфальті. Проба взята з частини, де корінь переходить у розетку (виноска 2 в табл. 3) – масивна частина, багата молочним соком. Імовірно, в одному листку кульбаби органічно зв'язаний тритій (ОЗТ) розповсюджується нерівномірно – там, де товста частина від розетки (багата молочним соком), концентрація вища, ніж на кінці листа (тонка частина, майже без молочного соку).

Для отримання водного екстракту рослин для проведення вимірів було достатньо органічної сировини частин «корінь» та «лист» і мало – «квітконосна стрілка» і «квітка». За вагою відношення «лист : квітконосна стрілка» були взяті в пропорції 3 : 1.



а) Кульбаба № 1, зона 2



б) Кульбаба № 2, зона 1



в) Кульбаба № 3, зона 1



г) Кульбаба № 4, зона 1



д) Кульбаба № 5, зона 1

Рисунок 3 – Обрані екземпляри рослин для дослідження

Подальші дослідження вмісту тритію у кульбабі лікарській відбувалися за умов збільшення температури повітря та зменшення вологи. Крім того, у кульбаб вже закінчувався вегетаційний період і майже всі рослини з досліджуваної території не мали квіток. Дослідження поодиноких рослин із зазначених раніше зон наведені в табл. 4.

Таблиця 4 – Питома активність тритію екстракту з різних частин кульбаби лікарської наприкінці вегетаційного періоду

№	Місце збору	Частина рослини, вміст Т, Бк/л						
		Корінь	Прикоренева розетка	Лист	Квітконосна стрілка	Квітка	Бутон	Відквітка
1	Зона 2	11370,4	7017,93	9341,43	9558,73	11976,8	17724,1	9673,16
2	Зона 1	10851,2	6982,96	9176,47 / 9332,42*	10876,5	-	17696,5	13091,3

* через дріб подані дані «початок листка» / «верхівка листка»

Були вибрані 2 рослини кульбаби, які мали одночасно і квітки, і бутони. Без зважування перед приготуванням проб були приблизно такі пропорції (в порядку убавання ваги):

- (1) корінь – найбільша і найважча частина;
- (2) прикоренева розетка;
- (3) лист і (4) квітконосна стрілка;
- (5) квітка та (6) відцвіла квітка;
- (7) бутон.

Пропорції використання сировини для створення водного екстракту проб (табл. 4) наступні:

$$(1) 3 : (2) 3 : (3) 2 : (4) 2 : (5) 1 : (6) 1 : (7) 0,5.$$

Було підмічено, що з підвищенням спеки питома активність тритію екстрактів знижується. При цьому зменшується і кількість молочного соку кульбаб – рослини грубішають, квітка перетворюється в насіння, квітконосна стрілка засихає. До цього спостерігалось, що бутони кульбаби містять більшу кількість молочного соку, ніж інші частини рослини.

Подальші дослідження довели, що з підвищенням температури повітря та переходом кульбаби лікарської до «літнього спокою» питома активність тритію в органічній сировині зменшується. Дослід з водою, отриманою з транспірації рослини, показав, що концентрація тритію води транспірації та у ґрунті не підвищується. Воду транспірації було отримано шляхом встановлення скляного кубу або поліетиленового покриву типу парник над рослиною. Стінки такого пристрою були заглиблені у землю та присипані ґрунтом, для обмеження надходження вологи і повітря ззовні.

Відомо, що 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 [4]. Після видалення ґрунтової вологи (вільна вода) деяка частина тритію залишається в ґрунті в іонообмінній та сорбованій формах. Корені та інші підземні органи рослин відносно активно збагачуються ^3H . Розподіл органічно зв'язаного тритію (ОЗТ) у тканинах і органах рослин неоднорідний.

Кульбаба має деякі особливості та відмінності від інших рослин, що ростуть на терені досліджень. Корінь кульбаби досягає у довжину 60 см. Суцвіття і листя містять в собі речовини, багаті гідроксильними групами: каротиноїди – тараксантин $\text{C}_{40}\text{H}_{56}\text{O}_4$, флавоксантин $\text{C}_{40}\text{H}_{56}\text{O}_3$, лютеїн (ксантофіл) $\text{C}_{40}\text{H}_{56}\text{O}_2$, віолаксантин $\text{C}_{40}\text{H}_{56}\text{O}_2$; тритерпенові спирти – арнідіол $\text{C}_{30}\text{H}_{50}\text{O}_2$ та фарадіол. З коренів кульбаби виділені тритерпеноїдні сполуки – тараксерол (альнулін, скимміол) $\text{C}_{30}\text{H}_{50}\text{O}$, тараксастерол (тараксастерин, α -лактучерол, α -антестерин) $\text{C}_{30}\text{H}_{50}\text{O}$, псевдотараксастерол $\text{C}_{30}\text{H}_{50}\text{O}$, β -амірин $\text{C}_{30}\text{H}_{50}\text{O}$, стерини β -ситостерин $\text{C}_{29}\text{H}_{50}\text{O}$ та стигмастерин $\text{C}_{29}\text{H}_{48}\text{O}$. Також корені містять тараксол $\text{C}_{30}\text{H}_{46}\text{O}_3$, інулін до 24%, каучук до 3% та жирну оливу з гліцеридом пальмітинової, олеїнової, лінолієвої, мелісової, церотинової кислот.

В межах наших досліджень найбільшу увагу привертає натуральний каучук, який містить 91–96% вуглеводів поліізопрену $(\text{C}_5\text{H}_8)_n$, який є стереорегулярним полімером (рис. 4).

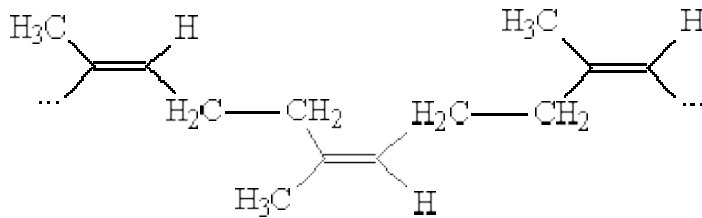


Рисунок 4 – Будова молекули поліізопрена натурального каучука

Майже всі ланки ізопрену макромолекули натурального каучуку поєднані у цис-1,4-стані: молекула натурального каучуку може містити 20-40 тис. елементарних ланок, молекулярною масою 1 400 000–2 600 000. Молекули каучуку закручені у кубельця. Якщо стрічку каучуку розтягувати та деформувати, то кубельця розкручуються у напрямку сил, що додаються, і стрічка витягується. Однак цим молекулам енергетично вигідно знаходитися у початковому стані. Коли напруга зменшується, молекули знову скручуються в клубки.

Враховуючи зазначене та на основі проведених вимірів, можна вивести наступний механізм міграції тритію в органічній речовині кульбаби лікарської:

а) в активний вегетаційний період, коли рослина викидає бутони, кульбаба лікарська росте дуже швидко, особливо – квітконосна стрілка і бутон. Для цього рослині потрібно багато води, яку вона отримує завдяки стрижневому гіллястому кореню з шарів ґрунту, які багаті на НГО та ОЗТ;

б) активне зростання квітконосної стрілки та її наповнення водою під осмотичним тиском через потужну кореневу систему викликає деформацію

молекул поліізопрену і, вірогідно, інших молекул, багатих гідроксильними групами, які проявляють слаболужну реакцію;

в) молекули речовин розгортаються, у зв'язку з чим відбувається вільний притік води до органів і тканин рослини, завдяки чому вони збагачуються ^3H ;

г) слаболужна реакція молочного соку кульбаби лікарської сприяє цьому процесу – молекули гідроксильних груп легко обмінюють атоми водню на атоми тритію;

д) сповільнення росту рослини викликає скручування молекул у початковий стан з акумуляцією тритію у речовині молочного соку. Відтік соку відбувається з верхівки до кореня та потужного багатоголового кореневища;

ж) подальший перехід кульбаби лікарської у стан літнього спокою викликає відмирання квітконосної стрілки, огрубіння листя та його подальше всихання, з активним акумулюванням речовин у кореневій системі рослини.

Досліди та виміри, подібні до проведених з кульбабою лікарською, були здійснені з іншими рослинами, що містять молочний сік – молочаєм сонцеглядом (*Euphorbia helioscopa* L.) та молоканом диким (латук дикий – *Lactuca serriola*). Були отримані схожі результати, які підтверджують описаний механізм міграції тритію у системі «вода – рослина» серед рослин з природним каучуком.

Висновки

У роботі наведені попередні результати дослідження міграції радіоізотопу водню – тритію – в органічній речовині рослин. Робота виконана на прикладі кульбаби лікарської – рослини, що містить значну кількість речовин, багатих гідроксильними групами, та натуральний каучук. Це обумовило обрати зазначену рослину як базову у дослідженні міграції тритію у системі «вода – рослина» та акумуляції його тканинами рослини. Такий вибір отримано в результаті ряду вимірів водного екстракту різноманітних рослин, що ростуть в санітарній зоні підприємства, яке тривалий час працювало з тритієм. Проведені дослідження дозволили окреслити загальний механізм міграції ^3H в органічній речовині рослин, що містять природний каучук.

Проведені дослідження вимагають подальшої деталізації за наступними напрямками:

1) вивчення процесу газообміну рослин між собою для опису механізму передачі ^3H рослинам, які не пов'язані кореневими системами в середовищі ґрунту (ізолювані рослини);

2) дослідження руху тритію при гальмуванні процесу фотосинтезу у рослин;

3) аналіз клітинної форми різноманітних органів і тканин рослин, які знаходилися під тривалим впливом НТО та ОЗТ в природному середовищі.

Зазначені напрями дозволять представити більш розгорнутий механізм міграції тритію в органічній сировині рослин.

Окреслені дослідження мають велику практичну цінність: механізм міграції тритію та дослідження впливу тритію на рослинний чи тваринний організм в процесі міграції дозволить мінімізувати проникнення ^3H до організму людини та знизити ризик опромінення зазначеним радіонуклідом.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Tritium in some typical ecosystems // Technical reports series. – Vienna: IAEA, 1981. – #207. – 118 p.
2. Brown R.M. Enviromental tritium in tress // Proceedings of the Symposium on Behavior of Tritium in the Enviroment (16-20 Oct., 1978). – San Francisko: Jointly organised by IAEA and NEA. 1979. – P. 405–417.
3. Беловодский Л.Ф., Гаевой В.К., Гришмановский В.И. Тритий. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 247 с.
4. Долін В.В., Пушкарьов О.В., Шраменко І.Ф. та ін. Тритій у біосфері. – К.: Науково-виробниче підприємство «Видавництво «Наукова думка» НАН України», 2012. – 224 с.
5. Mihok S., Wilk M., Lapp A., Clark I.D. Tritium dynamics in soils and plants grown under three irrigation regimes at a tritium processing facility in Canada // Journal of Environmental Radioactivity 153:176-187 · March 2016.
6. Коваленко О.В. Моделювання міграції тритію в навколишньому середовищі / О.В. Коваленко // Математичне моделювання в економіці. – 2015. – № 2. – С. 51–64.
7. Довгий С.О., Бідюк П.І., Трофимчук О.М. Системи підтримки прийняття рішень на основі статистично-ймовірнісних методів. – К.: Логос, 2014. – 419 с.

Стаття надійшла до редакції 09.09.2016