

В. В. Долін*, В. М. Бобков

Державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України», Київ, Україна

*Відповідальний автор: vdolin@ukr.net

**ДОЗОЗАЛЕЖНІ ЕФЕКТИ ІЗОТОПНОГО ОБМІНУ ТРИТІО
В ПРОЦЕСІ ВЕГЕТАЦІЇ ВЕРБИ**

Досліджено кінетику перерозподілу тритію між компонентами живої та неживої речовини екосистеми верби білої в «greenhouse» експериментах. Показано, що величина концентрації тритію у водному середовищі живлення помітно впливає на кінетичні параметри його асиміляції в органічній та неорганічній речовині організму верби білої (*Salix alba* L.). Описано кінетику надходження тритію з водного середовища живлення до внутрішньоклітинного соку, органічної фази рослин та транспіраційних випарів залежно від концентрації надважкого ізотопу водню. Виявлено дозозалежні ефекти, що супроводжуються фракціонуванням ізотопів водню в усіх компонентах біосистеми – водному середовищі живлення, внутрішньоклітинному соку, транспіраційних випарах та в органічній фазі. Установлено, що зі збільшенням початкової об'ємної активності тритію у водному середовищі живлення (у 8,6 раза) зростає швидкість виведення тритію з неї та з внутрішньоклітинного соку (у 14,8 та 15,6 раза відповідно), знижується ступінь асиміляції цього ізотопу до внутрішньоклітинного соку (у 41,3 раза), зменшується його частка, що потрапляє до органічної фази деревини (у 1,3 раза), зменшується відносна частка тритію у транспіраційній воді (у 5,7 раза). Доведено існування фізіологічних бар'єрів, що різко й суттєво обмежують асиміляцію тритію в компоненти верби. Так, величина бар'єра, при міграції цього ізотопу водню до внутрішньоклітинного соку, досягає 15 % і лише 18 – 25 % тритію потрапляє із зовнішньої води до органічної фази.

Ключові слова: тритій, верба біла, внутрішньоклітинний сік, органічно зв'язаний тритій, транспірація, кінетика, дозозалежний ефект.

1. Вступ

У попередніх дослідженнях [1, 2] нами описано результати модельних (greenhouse) експериментів щодо вивчення процесів біоміграції тритію з оточуючої води (середовища живлення) в рослинність, що дало змогу в контрольованих умовах оцінити швидкість накопичення та перерозподілу цього ізотопу в компонентах біосистеми. На прикладі верби білої, у процесі її вегетації, виявлено, що розподіл тритію у біосистемі, що вивчалася, має особливості залежно від його вихідної об'ємної активності у водному середовищі живлення. Тобто простежується певний дозозалежний ефект. Під дозозалежним ефектом у цьому дослідженні ми розуміємо залежність відгуку біологічного об'єкта (живої матерії рослини верби) від рівня об'ємної активності тритію у водному середовищі живлення (неживій матерії). В якості індикатора радіобіологічних ефектів авторами обрано водне середовище живлення (в якому під впливом рослин відбувається зміна об'ємної активності), внутрішньоклітинний сік рослин, органічна речовина рослин і транспіраційна вода. З метою більш детального вивчення такого ефекту нами поставлено додатково два експерименти з мінімальною та максимальною концентрацією тритію у водному середовищі живлення (зовнішній воді). Для більш чіткого

прояву ізотопного ефекту концентрацію тритію в середовищі існування підбирали таким чином, щоб у кожному наступному експерименті вона вдвічі перевищувала попередню. У попередніх дослідженнях концентрації тритію в середовищі живлення ($C_{\text{вих}}$) становили 2810 та 5621 Бк/дм³ [1, 2]. Отже, для дослідження концентраційних (дозозалежних) ефектів додатково було поставлено експерименти з концентраціями тритію в середовищі живлення 1389 та 11986 Бк/дм³.

В останні десятиріччя проблемам біогеоміграції, акумуляції, інкорпорації, дозиметрії та стандартизації тритію в об'єктах навколишнього природного середовища у світі приділяється багато уваги, передусім, у зв'язку з протиріччями у визначенні безпечних для живих організмів концентрацій [3 - 7]. У сучасних експериментальних дослідженнях щодо вивчення міграції тритію в рослинах, наприклад [8 - 10], використовуються інші підходи у відмінних умовах, що ускладнює порівняння результатів.

Метою роботи є вивчення концентраційних (дозозалежних) ефектів фракціонування тритію в екосистемі верби білої: «зовнішнє водне середовище – внутрішньоклітинний сік – органічно зв'язана форма тритію – транспірація з листя».

У роботі використовували дві ємності з тритійованою водою вихідною об'ємною активністю

© В. В. Долін, В. М. Бобков, 2020

1389 та 11986 Бк/дм³ і саджанці верби білої (*Salix alba* L.). Вибір цього об'єкта дослідження визначався природною поширеністю верби, її невибагливістю, пристосованістю до зростання у водному середовищі. При штучному освітленні верба добре почувається в умовах модельного експерименту тривалий час. Невеликий (100 - 150 г) розвинутий саджанець верби (з корінням та листям) тривалий час добре росте у воді, а відносно велика маса дає змогу отримати достатню кількість як внутрішньоклітинної, так і води після спалювання сухого залишку, що істотно збільшує точність експерименту. Низка однакових саджанців, що контактують із тритійованою водою в одноманітних умовах, дає змогу послідовно досліджувати ступінь накопичення в них тритію через певні проміжки часу.

2. Методика експерименту

Придатні живці верби (масою 140 - 300 г та довжиною 50 - 65 см) були нарізані із здорових гілок верби білої в період вегетації. Вони витримувались у воді під поліетиленовою плівкою протягом 2 - 3 тижнів до появи коренів та розкриття бруньок. Далі, для кращого росту, живці були висаджені в пластикові ящики із землею при денному люмінесцентному цілодобовому освітленні в теплій кімнаті. Ще за 2 - 3 тижні живці активно розвивають гілля (20 - 30 см), вкриті великою кількістю листя. Готові до експерименту рослини обережно викопували та переносили в пластикові прямокутні місткості (1 та 2), ємністю по 80 л (рис. 1). У місткість 1 було висаджено 26 саджанців, а в місткість 2 - 15 саджанців. В ємності заливали по 75 л відстояної водопровідної води з фоновим вмістом тритію 6 - 7 Бк/дм³ та витримували рослини ще один тиждень для акліматизації.



Рис. 1. Постановка експерименту.

Обидві ємності накривали полістирольними пластинами для зменшення випаровування води. Для забезпечення освітленості близько 2000 лм/м² над рослинами на відстані 0,5 м розташовували дві люмінесцентні лампи, що світили цілодобово. Температуру води підтримували на рівні 15- 18 °С.

Через тиждень в обидві ємності було додано невелику кількість концентрованої тритійованої води таким чином, щоб після її розбавлення, початкова об'ємна активність води в місткості 1 становила 11986 Бк/дм³, а в місткості 2 - 1389 Бк/дм³. З цього моменту починали відлік часу модельного експерименту. Для збирання транспіраційної води, яка випаровується з листя,

у пластикові чашки Петрі з низькими краями (для кращого поглинання пари) насипали по 30 г прожареного хлористого кальцію. Ємності з хлористим кальцієм приміщували в гущі зеленого листя.

Один раз на тиждень з кожної ємності відбирали пробу зовнішньої води (середовища живлення), чашку Петрі з хлористим кальцієм із гущі листя та по одному саджанцю. Насичений водою хлорид кальцію переносили до колби Вюрца і за допомогою газового пальника відганяли поглинену воду.

Корінці рослин видаляли, а стовбур протирали фільтрувальним папером до сухого стану. Після зважування саджанець з молодими гілками та

листя розрізали на невеликі шматки (5 - 6 см) і переносили в скляну ємність, куди приміщували стакан з 60 г прожареного безводного хлористого кальцію. Ємність закривали чашкою Петрі й витримували в сушильній шафі за температури 100 °С протягом 24 год. Потім насичений водою хлорид кальцію переносили до колби Вюрца і за допомогою газового пальника відганяли поглинену вологу.

Напівсуху рослинність у відкритій ємності досушували ще 1 добу за температури 100 °С до сталої маси. Сухий залишок зважували, перенесли у кварцову трубку та обережно спалювали у струмені кисню. Пари води на виході з трубки конденсували за допомогою зворотного холодильника. Отриману воду, забруднену продуктами горіння, кілька разів переганяли з додаванням неорганічного безводного окиснювача до повного окиснення органічних домішок.

Пробу зовнішньої води з кожної ємності також переганяли з додаванням окиснювача. На основі очищених зразків води готували лічильну форму: у спеціальну поліетиленову віалу ємністю 20 мл наливали 8 г перегнаної досліджуваної води. До проби додавали 12 г сцинтиляційної

рідини OPTIPHASE HiSafe 3 виробництва фірми "Perkin Elmer". Суміш ретельно перемішували і проводили вимірювання за допомогою ультранизькофонового рідинно-сцинтиляційного α - β -спектрометра Quantulus 1220-003 виробництва Фінляндії.

3. Результати експериментів та обговорення їх

Аналіз отриманих результатів щодо процесів поглинання тритію з водного середовища живлення рослинами та його перерозподілу в різних компонентах біосистеми показав, що незважаючи на різну початкову концентрацію тритію в середовищі живлення, кінетика зазначених процесів має багато спільного. Водночас зі збільшенням концентрації тритію в середовищі існування (зовнішній воді) спостерігається диференціація кінетичних параметрів біологічної асиміляції надважкого ізотопу водню. Наведені на рис. 2, *a* і *г* дані отримано у цьому дослідженні, на рис. 2, *б* і *в* – отримано нами раніше [1]. Початкова концентрація тритію у водному середовищі живлення послідовно збільшується приблизно вдвічі в напрямку від *a* до *г*.

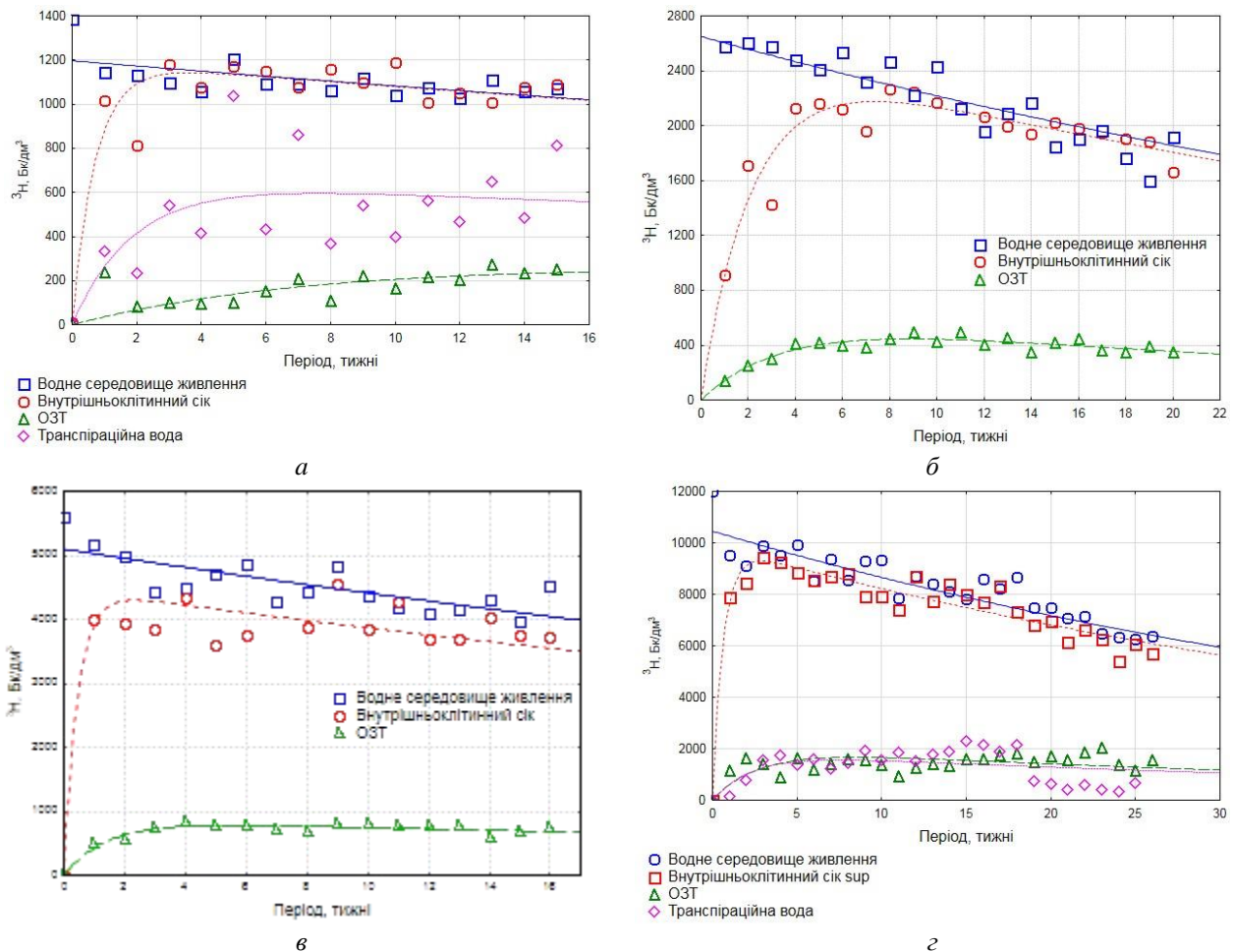


Рис. 2. Часова динаміка перерозподілу тритію між компонентами екосистеми верби білої за вихідної концентрації у водному середовищі живлення, Бк/дм³: *a* = 1389; *б* = 2811; *в* = 5621; *г* = 11986.

Порівнюючи наведені графіки між собою, видно, що при найменшій експериментально дослідженій об'ємній активності тритію (див. рис. 2, а) його концентрація у клітинному соку протягом трьох тижнів досягає відповідної концентрації тритію водного середовища живлення і в подальшому при зростанні верби ці концентрації практично збігаються. В експериментах з більшою вихідною об'ємною активністю тритію у водному середовищі живлення його асиміляція в біологічній рідині верби зростає до істотно менших концентрацій, ніж концентрація зовнішньої води. Цікаво відзначити, що зі зростанням об'ємної активності тритію у водному середовищі живлення ступінь диференціації збільшується (див. рис. 2, б - з).

Для кількісної оцінки отриманих результатів були підібрані придатні математичні моделі, які з високою достовірністю описують кожний процес. Як відомо, кінетичні процеси найчастіше відбуваються за експоненціальним законом розподілу. Тому саме такі моделі були вибрані нами для обробки отриманих результатів. Одностадійний процес зменшення концентрації тритію в зовнішній воді добре описується за найпростішим експоненціальним рівнянням

$$C_t = PA \cdot e^{-k_1 t}, \quad (1)$$

де C_t – поточна концентрація тритію у воді; PA – початкова концентрація тритію у воді; k_1 – константа швидкості процесу.

Двостадійні процеси асиміляції тритію біологічною рідиною живої речовини верби у сполученні з винесенням його з системи внаслідок транспірації описуються як

$$C = A_{BC_{max} \cdot OЗТ_{max} \cdot ТПВ_{max}} \cdot e^{-k_1 t} \cdot (1 - e^{-k_{2,4} t}), \quad (2)$$

де A – максимальна концентрація тритію, що включається в процеси біогенної міграції в неорганічній внутрішньоклітинній водній (BC), органічно зв'язаній (OЗТ) та транспіраційній пароводяній формі (ТПВ); $k_{2,4}$ – константи швидкості відповідних процесів: дифузії тритійованої води через пори кори, клітинні мембрани та кореневого живлення (k_2), трансформації тритію в органічно зв'язану форму внаслідок ізотопного обміну та фотосинтезу (k_3), транспірації (k_4).

Розраховані за допомогою статистичної програми "STATISTICA" коефіцієнти для всіх значених моделей наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Константи швидкості процесів біоміграції тритію при вирощуванні верби білої в середовищі тритійованої води

Компонент екосистеми (математична модель)	Параметри	Початкова концентрація тритію у воді, Бк/дм ³			
		1389 (рис. 2, а)	2811 (рис. 2, б)	5621 (рис. 2, в)	11986 (рис. 2, з)
Водне середовище живлення (1)	ПА, Бк/дм ³	1197	2650	5099	10458
	k_1, c^{-1}	$2,22 \cdot 10^{-9}$	$3,95 \cdot 10^{-9}$	$3,20 \cdot 10^{-9}$	$4,20 \cdot 10^{-9}$
Внутрішньоклітинний сік рослин (2)	$A_{BC_{max}}, Bк/дм^3$	1193	2580	4473	9936
	k_2, c^{-1}	$3,02 \cdot 10^{-7}$	$9,79 \cdot 10^{-8}$	$4,86 \cdot 10^{-7}$	$3,37 \cdot 10^{-7}$
Органічно зв'язаний тритій (OЗТ) (2)	$A_{OЗТ_{max}}, Bк/дм^3$	335	646	864	2066
	k_3, c^{-1}	$2,53 \cdot 10^{-8}$	$5,68 \cdot 10^{-8}$	$1,55 \cdot 10^{-7}$	$7,68 \cdot 10^{-8}$
Транспіраційна вода (2)	$A_{ТПВ_{max}}, Bк/дм^3$	654	Не визначалося		1878
	k_4, c^{-1}	$1,16 \cdot 10^{-7}$			$9,10 \cdot 10^{-8}$

З графічної інтерпретації експериментальних даних очевидно, що всі знайдені експоненціальні залежності мають спадну частину (див. рис. 2). Лінійний характер спадної частини всіх графіків у межах часового проміжку експерименту дає змогу кількісно оцінити дозозалежний ефект біоасиміляції тритію. Розраховані показники тангенса кута нахилу (tg) для ліній спаду активності тритію у водному середовищі живлення (BCЖ) та внутрішньоклітинному соку рослин (BC), а також відповідні відрізки на осі ординат у точці перетину з лінією апроксимації експериментальних даних для всіх чотирьох графіків наведено в табл. 2. Висока кореляція ($K_{кор} \approx 0,99$) між кутом нахилу та початковою об'єм-

ною активністю тритію у водному середовищі живлення свідчить, що рослини чуттєво реагують на кількість цього ізотопу, і чим його більше, тим активніше саджанці верби його поглинають (рис. 3). Треба відзначити також, що спостерігається помітна кореляція ($K_{кор} \approx 0,72$) між початковою об'ємною активністю тритію у водному середовищі живлення та різницею рівнів відповідних графіків для зовнішньої води і соку рослин ($A_{BCЖ} - A_{BC}$). Це свідчить про наявність фізіологічного бар'єра біоасиміляції тритію. Величина такого бар'єра збільшується зі зростанням концентрації тритію в зовнішній воді та досліджуваних органах рослин і становить 1,3 - 15 %.

Таблиця 2. Розраховані значення тангенсів кута нахилу спадної лінійної частини графіків на рис. 2

Початкова активність (ПА), Бк/дм ³	Водне середовище живлення (ВСЖ)		Внутрішньоклітинний сік рослин (ВС)		A _{ВСЖ} – A _{ВС}
	tg _{ВСЖ}	A _{ВСЖ} , Бк/дм ³	tg _{ВС}	A _{ВС} , Бк/дм ³	
1389	-10,159	1186	-9,124	1171	15
2811	-40,208	2728	-32,451	2459	269
5621	-65,51	5074	-45,428	4314	760
11986	-150,0	10297	-142,19	9678	619
Ккор	-0,996	0,999	-0,986	0,999	0,715

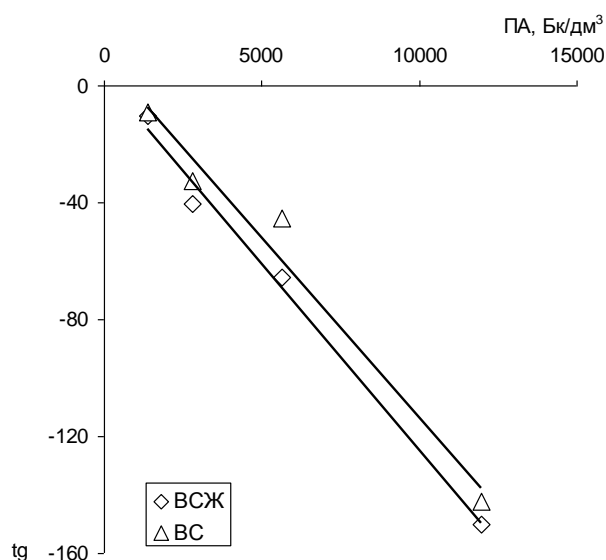


Рис. 3. Ліній регресії дозозалежного ефекту асиміляції тритію внутрішньоклітинним соком верби білої: ПА – початкова активність; ВСЖ – водне середовище живлення; ВС – внутрішньоклітинний сік.

Концентрація органічно зв'язаного тритію ($A_{\text{ОЗТ}}$) істотно нижча, ніж у вихідній воді та внутрішньоклітинних соках верби. Його накопичення проходить через максимум ($A_{\text{ОЗТmax}}$), а потім поступово спадає. Таким чином, спостерігається значний фізіологічний бар'єр, який перешкоджає асиміляції тритію в органічній фазі рослин. Для того щоб оцінити вплив початкової об'ємної активності тритію у водному середовищі живлення (ПА) на величину зазначеного бар'єра в табл. 3 наведено дані по кожному експерименту. Кількісно величину бар'єра можна оцінити як відношення $A_{\text{ОЗТmax}}$ до $A_{\text{ВСЖt}}$ (t - час досягнення максимальної концентрації) або до ПА у відсотках (V_t) та (V_{max}) відповідно:

$$V_t = 100 \cdot \frac{A_{\text{ОЗТmax}}}{A_{\text{ВСЖt}}} \cdot 100, \quad (3)$$

$$V_{\text{max}} = 100 \cdot \frac{A_{\text{ОЗТmax}}}{\text{ПА}} \cdot 100. \quad (4)$$

Спостерігається висока кореляція між максимальними значеннями питомої об'ємної активності

ОЗТ та ВС ($K_{\text{кор}} \approx 0,99$) (див. табл. 2 та 3). Коефіцієнт кореляції між величиною бар'єрів V_t , V_{max} та величиною $A_{\text{ВС}}$ істотно менше (0,56 та 0,78). Проте спостерігається тенденція щодо збільшення величини бар'єра зі зростанням початкової об'ємної активності тритію у зовнішній воді від 75 до 85 % (табл. 3). Таким чином можна зробити висновок, що чим більша початкова об'ємна концентрація тритію у зовнішній воді, тим менша його частка асимілюється в органічній фазі деревини.

Таблиця 3. Асиміляція тритію в органічно зв'язану фазу рослин

ПА, Бк/дм ³	A _{ОЗТmax} , Бк/дм ³	V _t , %	V _{max} , %
1389	272	75,5	80,4
2811	492	76,9	82,5
5621	832	81,5	85,2
11986	1815	79,1	84,9

У процесі транспірації рослини через листя випаровують в атмосферу велику кількість води. Цей процес супроводжується фракціонуванням важких ізотопів водню, що розглядалося нами раніше [1, 2]. Проведені в даному експерименті дослідження дали змогу оцінити кінетику накопичення тритію в транспіраційній воді (див. рис. 2, а, з). Незважаючи на те, що транспіраційні випари є часткою внутрішньоклітинного соку, виявилось, що кінетичні параметри цих процесів істотно розрізняються. Активність тритію у транспіраційній воді є істотно нижчою, ніж у внутрішньоклітинному соку. Кінетичні параметри процесів трансформації тритію з водного середовища живлення у внутрішньоклітинний сік рослин та випаровування останнього через продихи листя розрізняються у 2 - 5 разів, що також свідчить про наявність фізіологічного бар'єра (див. табл. 2). Спостерігається також істотний дозозалежний ефект: за найнижчої дослідженої ПА (1389 Бк/дм³) активність транспіраційної води становить 50,4 % від активності соку, у той час як за найбільшої дослідженої ПА (11986 Бк/дм³) це відношення становить лише 8,8 %, що майже у 6 разів менше. Імовірно, що саме процеси

фотосинтезу, що відбуваються в листях, є головними чинниками впливу на фракціонування ізотопів водню в ході їхнього проходження до поверхні рослин через продири та кутикули.

Слід зазначити, що застосований нами спосіб отримання транспіраційної води не дає змоги зробити однозначного висновку щодо механізму фізіологічного бар'єра. Волога, що поглинається безводним хлоридом кальцію, складається з двох компонентів: транспіраційної вологи та вологи повітря. Швидкість поглинання хлоридом кальцію вологи залежить від абсолютної вологості повітря. Тритій містить транспіраційну вологу. Отже, в умовах відкритої системи, без урахування складової повітря, отримані результати дослідження об'ємної активності тритію в транспіраційній волозі є оціночними.

4. Висновки

Проведені дослідження показали наявність складного механізму біологічного відклику живої речовини на радіоактивне забруднення сере-

довища існування – взаємодії організму рослин з тритійованою водою, що її оточує. Доведено існування фізіологічних бар'єрів, що різко і суттєво обмежують вільне проникнення тритію в живі компоненти верби. Імовірно, що процеси фракціонування надважкого ізотопу водню в органах рослин протягом вегетації зумовлено фотосинтетичною активністю.

Виявлено низку дозозалежних ефектів ізотопного обміну тритію в різних компонентах верби в процесі її вегетації.

Зі збільшенням початкової активності зовнішньої води (у 8,6 раза) встановлено:

зростає швидкість виведення тритію з неї та з внутрішньоклітинного соку (у 14,8 та 15,6 разів відповідно);

знижується ступінь асиміляції цього ізотопу внутрішньоклітинним соком (у 41,3 раза);

зменшується його частка, що потрапляє до органічної фази деревини (у 1,3 раза);

зменшується відносна частка тритію, що транспірується (оціночно в 5,7 раза).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. В.М. Бобков, В.В. Долін. Ізотопний обмін тритію в процесі вегетації верби. *Зб. наук. праць Ін-ту геохімії навколишнього середовища НАН України. Сер. «Геохімія та екологія»* 25 (2016) 49.
2. V.V. Dolin et al. Isotopic Effects of Tritium During the Growth of White Willow. *Universal Journal of Geoscience* 6(6) (2018) 175.
3. Tritium in Some Typical Ecosystems. *Technical Reports Series 207* (Vienna: IAEA, 1981).
4. *Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle. Principles and Applications. Vol. 1, chapter 3. Abundance and Fractionation of Stable Isotopes* (Vienna: IAEA, 2000) p. 23.
5. *Modelling the Environmental Transport of Tritium in the Vicinity of Long Term Atmospheric and Sub-Surfaces Sources. Report of the Tritium Working Group of the Biosphere Modelling and Assessment (BIOMASS) Programme, Theme 3* (Vienna: IAEA, 2003).
6. *Quantification of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments for Radiological Assessments. IAEA TECDOC No. 1616* (Vienna: IAEA, 2009) 622 p.
7. *Tritium in the Biosphere*. Eds. E.V. Sobotovich, V.V. Dolin (Kyiv: Naukova dumka, 2012) 224 p.
8. В.А. Сыроватко. Тритийсодержащая вода в процессах водообмена растений. Дис. канд. биол. наук (К., 1984) 149 с.
9. C. Boyer et al. Tritium in plants: A review of current knowledge. *Environmental and Experimental Botany* 67 (2009) 34.
10. P. Le Goff et al. Isotopic fractionation of tritium in biological systems. *Environment International* 65 (2014) 116.

V. V. Dolin*, V. M. Bobkov

State Institution "The Institute of Environmental Geochemistry, National Academy of Sciences of Ukraine",
Kyiv, Ukraine

*Corresponding author: vdolin@ukr.net

DOSE-DEPENDENT EFFECTS OF ISOTOPIC EXCHANGE OF TRITIUM IN THE PROCESS OF WILLOW VEGETATION

The paper is devoted to the study of the kinetics of tritium redistribution between living and inanimate matter of white willow in the "greenhouse" experiments. It was shown that the concentration of tritium in the aquatic environment significantly affects the kinetic parameters of its assimilation in the organic and inorganic matter of the organism of the white willow (*Salix alba* L.). The kinetics of the influx of tritium from the aqueous nutrient into the intracellular juice, the organic phase of plants, and transpiration fumes, depending on the concentration of the superheavy hydrogen isotope, are described. Dose-dependent effects were identified, accompanied by fractionation of hydrogen isotopes in all

components of the biosystem - the aquatic food environment, intracellular juice, transpiration fumes, and in the organic phase. It was found that with an increase of the initial specific activity of aqueous feeding solution (by 8.6 times): the rate of tritium removal from it and from intracellular juice increases (by 14.8 and 15.6 times, respectively), the degree of assimilation of this isotope into intracellular juice decreases (by 41.3 times), and its the part that enters the organic phase of wood (1.3 times) decreases the relative proportion of tritium in transpiration water (5.7 times). The existence of physiological barriers that sharply and significantly limit the assimilation of tritium into the components of the willow has been proved. Thus, the value of the barrier during the migration of this isotope of hydrogen into the intracellular juice reaches 15 % and only 18 - 25 % of tritium gets from the external water into the organic phase.

Keywords: tritium, white willow, intracellular juice, organically bound tritium, transpiration, kinetics, dose-dependent effect.

REFERENCES

1. V.M. Bobkov, V.V. Dolin. Isotopic metabolism of tritium during the willow growing season. *Zbirnyk Naukovykh Prats Instytutu Heokhimiyi Navkolyshnoho Seredovyscha NAN Ukrayiny. Ser. "Heokhimiya ta ekolohiya"* 25 (2016) 49. (Ukr).
2. V.V. Dolin et al. Isotopic Effects of Tritium During the Growth of White Willow. *Universal Journal of Geoscience* 6(6) (2018) 175.
3. Tritium in Some Typical Ecosystems. *Technical Reports Series 207* (Vienna: IAEA, 1981).
4. *Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle. Principles and Applications. Vol. 1, chapter 3. Abundance and Fractionation of Stable Isotopes* (Vienna: IAEA, 2000) p. 23.
5. *Modelling the Environmental Transport of Tritium in the Vicinity of Long Term Atmospheric and Sub-Surfaces Sources. Report of the Tritium Working Group of the Biosphere Modelling and Assessment (BIOMASS) Programme, Theme 3* (Vienna: IAEA, 2003).
6. *Quantification of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments for Radiological Assessments. IAEA TECDOC No. 1616* (Vienna: IAEA, 2009) 622 p.
7. *Tritium in the Biosphere*. Eds. E.V. Sobotovich, V.V. Dolin (Kyiv: Naukova dumka, 2012) 224 p.
8. V.A. Syrovatko. Tritium-Containing Water in the Processes of Plant Water Exchange. Thesis of the Candidate of Biological Sciences (Kyiv, 1984) 149 p. (Rus)
9. C. Boyer et al. Tritium in plants: A review of current knowledge. *Environmental and Experimental Botany* 67 (2009) 34.
10. P. Le Goff et al. Isotopic fractionation of tritium in biological systems. *Environment International* 65 (2014) 116.

Надійшла/Received 08.04.2020