

[https://doi.org/\\_](https://doi.org/_)  
УДК 550.47:550.424

**Долін В.В., Бобков В.М.**

Долін В.В., д.г.н., проф., ДУ «ІГНС НАН України», ORCID:0000-0001-6174-2962, vdolin@ukr.net  
Бобков В.М., к.х.н., ст.н.сп., «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України», IGNS\_Bobkov@nas.gov.ua

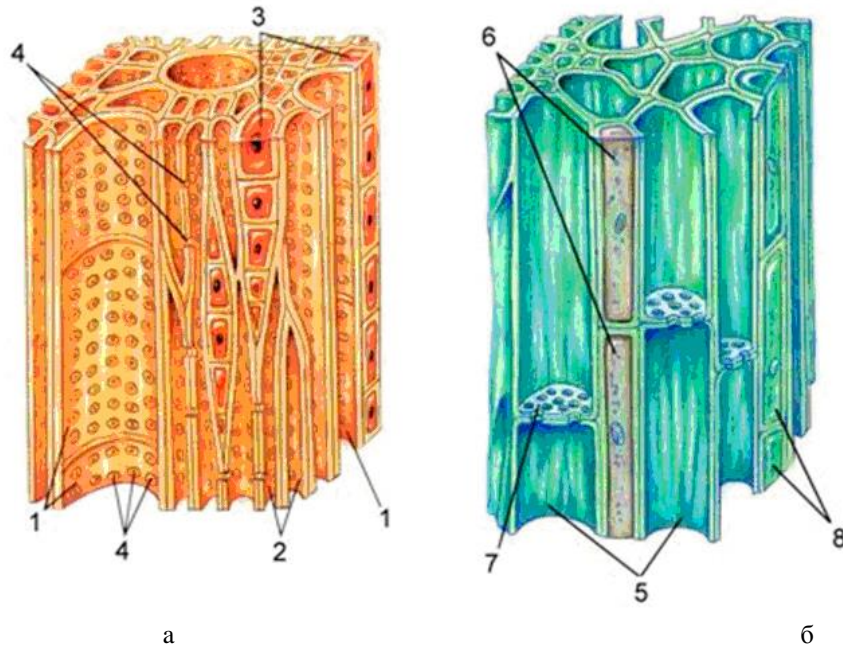
## ОСОБЛИВОСТІ ТРАНСПІРАЦІЙНОГО ПОТОКУ ТРИТІЙОВАНОЇ ВОДИ В ПРОЦЕСІ ВЕГЕТАЦІЇ ВЕРБИ

У модельному експерименті у часовій динаміці вивчено особливості транспіраційного руху тритієвої води з водної фази середовища живлення до органів верби білої (*Salix alba* L.). Результати експерименту проаналізовано з позиції хімічної кінетики. З експериментальних даних розраховано константи швидкості процесів винесення тритію біогенним потоком з водного середовища живлення, надходження його до внутрішньоклітинного соку деревини та листя, трансформації в органічно зв'язану форму. До 70 % тритію, що поглинається рослинами з водного середовища живлення, бере участь у транспіраційно-асиміляційному циклі через водопровідні тканини рослин, близько 30% – випаровується через листя в атмосферу. Вода середовища живлення з великою швидкістю ( $1,6 \pm 28\% \text{ м}^2 \times \text{с}^{-1}$ ) підіймається по ксилемі рослиною угору транспіраційним потоком. Протягом двох тижнів концентрація тритію у рослинному соку різних частин стовбуру практично вирівнюється. У листі в процесі фотосинтезу відбувається основний процес фракціонування ізотопів водню. Рівень тритію в листі унаслідок транспірації в атмосферу через продихи та кутикули істотно нижчий (на 29%), ніж у стовбурі. Отримані дані свідчать про «пороговий» механізм асиміляції тритію в органічній фазі рослин та циклічність процесів міграції у водній фазі живої речовини. Концентрація органічно зв'язаного тритію досягає максимального значення (7% від активності води середовища живлення) протягом першого тижня, у подальшому – знижується і вирівнюється у всіх частинах стовбура. За допомогою радіоактивного маркера – тритійованої води – встановлено питому швидкість висхідного ксилемного потоку води в саджанцях верби білої, яка становить  $(9,5 \pm 0,3) \times 10^{-5} \text{ з} \times \text{с}^{-1}$ .

**Ключові слова:** тритієва вода, верба біла, транспірація, внутрішньоклітинний сік, органічно зв'язаний тритій, випари з листя, концентрація, константа швидкості.

**Вступ.** У попередніх дослідженнях [1, 2] нами було проведено серію модельних (greenhouse) експериментів стосовно вивчення процесів ізотопного обміну тритію протягом вегетації рослинності в середовищі тритійованої води, які дозволили в контрольованих умовах оцінити швидкість накопичення та перерозподілу цього ізотопу в деревині. На прикладі верби білої було визначено особливості цих процесів за різних концентрацій тритію у водному середовищі живлення. У ході експериментів виявлено дозозалежні ефекти щодо розподілу  $^3\text{H}$  у живій речовині. Об'єктом попередніх досліджень був весь саджанець із усередненим рівнем тритію по всіх органах рослини. У реальних умовах лише його нижня третина знаходилась під водою, і саме через коріння та кору цієї частини тритієва вода потрапляла всередину всієї рослини. У зв'язку з цим являє інтерес більш детальне вивчення всього транспіраційного процесу проходження тритієвої води в системі «водне середовище живлення – корені – різні частини стовбуру – листя – атмосфера» через водопровідні тканини верби.

Як відомо [3-5], провідні тканини транспортують поживні речовини у двох напрямках. Висхідний (транспіраційний) потік рідини (водні розчини та солі) відбувається трахеїдами та судинами ксилеми від коренів по стеблу до листя. Низхідний (асиміляційний) потік розчину органічних речовин відбувається від листя до стовбуру та підземних органів рослини по ситовидних трубках флоєми. Провідна тканина рослини нагадує кровоносну систему людини, оскільки має осьову та радіальну сильно розвинуту мережу, через яку поживні речовини потрапляють в кожную клітину живої рослини. У кожному органі рослини ксилема та флоєма розташовані поряд і представлені у вигляді тяжів – провідних жгутів [5]. Провідні тканини об'єднують всі органи рослини в єдину систему. Розрізняють два типи провідних тканин: ксилему та флоему (грец. xylon – дерево, phloios – кора, лико). Вони мають, як структурні (рис. 1), так і функціональні відмінності.



**Рис. 1.** Провідні тканини: а – ксилема, б – флоема: 1 – судини ксилеми, 2 – трахеїди, 3 – клітини деревинної паренхіми, 4 – пори, 5 – ситовидні трубки, 6 – клітини-супутниці, 7 – ситовидні поля, 8 – клітини луб'яної паренхіми.

**Fig. 1.** Conductive tissues: a - xylem, b - phloem: 1- xylem vessels, 2 - tracheids, 3 - wood parenchyma cells, 4 - pores, 5 - sieve tubes, 6 - satellite cells, 7 - sieve cells, 8 - lobe cells parenchyma.

Провідні елементи ксилеми утворені загиблими клітинами. Через них відбувається дальній транспорт води та розчинених у ній солей від коренів до листя (транспіраційний). Провідні елементи флоєми зберігають живий протопласт. Через них відбувається транспорт соку від фотосинтезуючого листя до кореню (асиміляційний)

Розвиток ксилеми у вищих рослин пов'язаний із забезпеченням водного обміну. Оскільки через епідерму постійно виводиться вода, така ж кількість вологи повинна поглинатись рослиною і надходити до органів, які здійснюють транспірацію. Наявність живого протопласту у водопровідних клітинах істотно гальмує транспорт води, тож мертві клітини тут виявляються більш функціональними.

Швидкість пересування розчинів ситовидними елементами становить до 150 см на годину. Це в тисячу разів перевищує швидкість вільної дифузії. Ймовірно, має місце активний транспорт, а багаточисленні мітохондрії ситовидних елементів та клітин-супутниць постачають для цього необхідну АТФ.

**Метою даної роботи** була оцінка швидкості всмоктування та подальшої вертикальної міграції тритію через стовбур до листя. Висхідний ксилемний потік є основним процесом, який відбувається за рахунок випаровування великої кількості води через пори листя (транспірація). У порівнянні з висхідним ксилемним потоком, потужність низхідного флоємного потоку є незначною і становить приблизно 0,2% від першого

[6, 7]. Третій, який потрапляє у внутрішньоклітинний сік, частково заміщує протій у деревині рослини та її компонентах, що також впливає на особливості його вертикального розподілу.

#### **Об'єкти та методи досліджень**

Об'єктами дослідження були тритієва вода, початковою вихідною активністю  $A_{init.} \approx 6663$  Бк $\times$ дм $^{-3}$  та 11 пророщених саджанців верби білої (*Salix alba L.*) Верба є зручним об'єктом, оскільки вона невибаглива, швидко дає корені і росте у воді. При штучному освітленні верба добре почувається в умовах модельного експерименту тривалий час. Невеликі (вагою 242 – 821 г та довжиною 63-109 см) розвинуті саджанці верби (з корінням та листям) тривалий час добре ростуть у воді, а відносно велика маса дає змогу отримати лічильну форму після спалення сухого залишку, достатню для вимірювання кількості органічно зв'язаного тритію, що істотно збільшує точність експерименту. Використання серії приблизно однакових саджанців, які контактують з тритієвою водою в однакових умовах, дає змогу досліджувати часові параметри процесів біологічного накопичення та розподілу тритію шляхом періодичного відбору проб.

В експериментальних умовах було забезпечено значний надлишок тритієвої води порівняно з кількістю, необхідною для живлення рослин. Тому по відношенню до концентрації тритію у цій «зовнішній» воді (середовищі живлення) визначали

розподіл та кількість тритію, що увійшла до складу біомаси верби білої.

### Методика експерименту

Придатні живці було нарізано із здорових гілок верби білої у період вегетації. Живці витримувались у водному розчині гетероауксину протягом 2 – 3 тижнів до появи коренів та розкриття бруньок. Далі, для кращого росту, живці було висаджено в ґрунт на вулиці. Ще за два-три тижні живці активно розвили

пагони (20-30 см), щільно вкриті листям. Готові до експерименту рослини обережно викопували та переносили у пластикову прямокутну ємність об'ємом 77 л. (рис. 2). У ємність було уміщено 11 саджанців. Далі в неї залили 68,5 л відстояної водопровідної води з фоновим вмістом тритію  $7 \text{ Бк} \times \text{дм}^{-3}$  та витримали рослини ще один тиждень для акліматизації. Через воду протягом всього експерименту пропускали невеликий потік повітря для запобігання гнилісних процесів.



Рис.2. Постановка експерименту

Fig. 2. Experimental set up.

Ємність накривали дошками та поліпропіленовими пластинами для зменшення випаровування води, а над рослинами на відстані 0,5 м було розташовано дві люмінесцентні лампи потужністю по 40 Вт, які світили цілодобово. Температуру води підтримували на рівні 12-15°C.

Через тиждень в ємність було додано невелику кількість концентрованої тритієвої води таким чином, щоб після її розбавлення початкова активність водного середовища живлення становила приблизно  $A_{\text{вих}} = 6663 \text{ Бк} \times \text{дм}^{-3}$ . З цього моменту починався відлік часу модельного експерименту. Для збирання транспіраційної води, яка випаровується з листя, у пластикові чашки Петрі діаметром 100 мм з низькими краями (для кращого поглинання оточуючої вологи) насипали по 30 г зневодненого хлористого кальцію. Чашки з хлористим кальцієм акуратно підвішували на тонких нитках у гущі зеленого листя.

Один раз на тиждень з ємності відбирали пробу зовнішньої води, поглинач з хлористим кальцієм із середини листя та по одному саджанцю. Насичений водою хлорид кальцію з чашки Петрі переносили до

колби Вюрца і за допомогою газового пальника відганяли всмоктану воду.

Корінці рослин видаляли, а стовбур протирали фільтрувальним папером до сухого стану. Після зважування саджанець з молодими гілками та листям розділяли на чотири частини. Окремо збирали листя. Стовбур очищали від молодих гілок і розділяли на три частини. Перша – та, що знаходилась під водою (низ). Надводну частину розрізали приблизно порівну надвое (середина та верх). Кожну отриману частину рослини розрізали на невеликі шматки (5-6 см) і переносили в 1 л скляну ємність, куди приміщували відкриту скляну посудину (хімічний стакан) з 50 г зневодненого хлористого кальцію. Ємність закривали скляною чашкою Петрі та витримували у сушильній шафі за температури 100°C протягом 24 годин. Потому насичений водою хлорид кальцію переносили до колби Вюрца і за допомогою газового пальника відганяли всмоктану воду.

Напівсуху рослинність досушували ще одну добу у відкритій склянці за температури 100°C до сталої ваги. Сухий залишок зважували. Стовбури



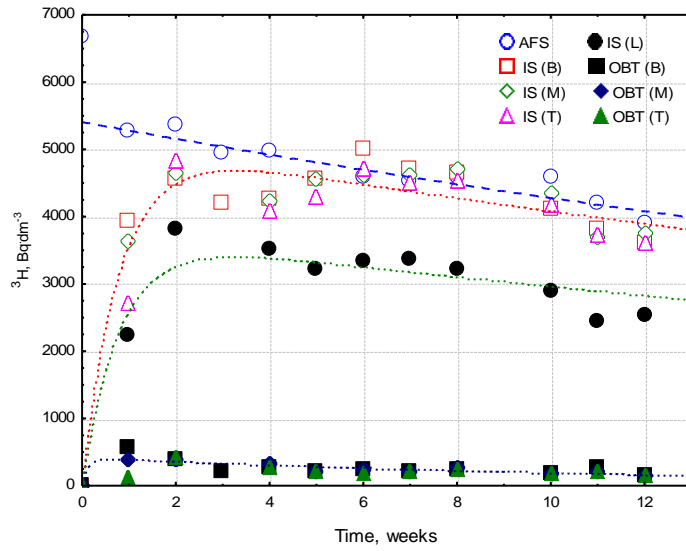
переносили у кварцеву трубку та обережно спалювали у струмені кисню. Пари води на виході з трубки конденсували за допомогою зворотного холодильника. Отриману воду, забруднену продуктами горіння, кілька разів переганяли з додаванням неорганічного безводного окиснювача до повного окиснення органічних домішок.

Пробу водного середовища живлення з ємності також переганяли з додаванням окиснювача. На основі очищених зразків води готували лічильну

форму: у спеціальну поліетиленову віалу ємністю 20 мл наливали 8 г переганеної 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  $\alpha$ - $\beta$ -спектрометра Quantulus 1220-003 виробництва Фінляндії.

### Результати досліджень та їх обговорення

Результати експерименту згруповано та наведено на рис. 3.



**Рис. 3.** Розподіл тритію між компонентами верби протягом експерименту: AFS – водне середовище живлення, IS – внутрішньоклітинний сік, OBТ – органічно зв'язаний тритій; частини дерева: B - нижня, M – середня, T – верхня, L – листя.

**Fig. 3.** Tritium distribution between willow tissues during the experiment: AFS – aqueous feeding solution, IS – intercellular sup, OBТ – organically bounded Tritium; Tree Tissues: B - bottom part, M – middle, T – top, L - leaves

Протягом експерименту спостерігалася надзвичайно висока швидкість транспіраційного потоку, що вело до вирівнювання концентрацій тритію. Істотна різниця концентрацій надважкого ізоотопу водню у водній фазі живої речовини та середовища живлення спостерігається лише протягом першого тижня. Якщо активність тритію у зовнішній воді через один тиждень після початку експерименту (AFS<sub>1</sub>) прийняти за 100%, то відносна активність внутрішньоклітинного соку в нижній частині саджанця (IS (B)) становить 75%, у середній (IS (M)) – 69 %, у верхній (IS (T)) – 51 %, у листі (IS (L)) – 43 %. Проте протягом другого тижня концентрація <sup>3</sup>H у всіх компонентах майже вирівнюється – 85, 86, 90 та 71% відповідно. Тритій потрапляє до рослини, передусім, через кореневу систему. Тому висхідний (транспіраційний) потік соку послідовно наповнює цим ізоотопом спершу нижні компоненти рослини, а потім і верхні, що призводить до різних його концентрацій у перший тиждень. Цікаво відмітити, що хоча швидкість всмоктування тритієвої води через клітинні мембрани коренів є досить високою, але вирівнювання концентрації <sup>3</sup>H у зовнішній воді та в соковій відбувається поступово протягом 5 тижнів.

Деяка інша динаміка надходження тритію до листя. Максимум накопичення <sup>3</sup>H у листі припадає на другий тиждень, що становить приблизно 71% від відповідної активності водного середовища живлення і потім, до кінця експерименту, це співвідношення майже не змінюється. Зауважимо, що загальний транспіраційний рух соку рослин спрямований саме до листя, з якого відбувається транспіраційне випаровування води в атмосферу. Ймовірно, що саме в листі відбувається основний процес фракціонування ізоотопів водню. Фактично це відомий процес фотосинтезу, коли під дією світла хлорофіл перетворює воду та вуглекислий газ на вуглеводи, з яких у подальшому формуються целюлоза, лігнін та інші компоненти деревини.

Як зазначалося вище, протягом п'яти тижнів активність тритію у внутрішньоклітинному соку деревини та водному середовищі живлення практично вирівнюється. Проте у внутрішньоклітинному соку листя концентрація тритію не перевищує 70% від неї. Постає питання: куди розподіляється решта його 30%? Припускаємо, що ця різниця випаровується в атмосферу. В даному експерименті кількість тритію у випарах не досліджувалась, але в аналогічному попередньому досліді [2] такі вимірювання проводились. Було

показано, що рівень  $^3\text{H}$  у випарах транспіраційної води з листя істотно залежить від його початкової концентрації у водному середовищі живлення. Так, за початкової концентрації  $1389 \text{ Бк} \times \text{дм}^{-3}$ , цей рівень становить близько 40 – 50% від неї, а за  $11986 \text{ Бк} \times \text{дм}^{-3}$  – 20-30%. В експерименті, який описано в цій роботі, початкова питома концентрація тритію у водному середовищі живлення становила  $6663 \text{ Бк} \times \text{дм}^{-3}$ , тобто була проміжною між концентраціями, дослідженими раніше. Отже, очікувана частка питомої концентрації тритію у транспіраційній воді, що випаровується з листя, – близько 30–40%. Ці розрахунки підтверджують припущення, що тритій у складі клітинного соку підіймається до листя і далі розділюється на дві частини – перша, основна (70%) залишається у листі і далі, асиміляційним потоком, спрямовується донизу, друга – менша (30%) – випаровується в атмосферу в процесі транспірації. Слід зазначити, що транспіраційна волога, яка випаровується з листя, змішується з атмосферною вологою, що істотно зменшує точність експерименту.

Органічна фаза рослин, яка утворює деревину, виступає акумулятором органічно зв'язаного тритію (Organically Bounded Tritium або ОВТ). Вона складається із заміщених полісахаридів загальною формулою  $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$ . На основі цієї структури можна розрахувати приблизну кількість водню в деревині, що становить  $\approx 6\%$

Проведені дослідження показали, що швидкість накопичення тритію в органічній речовині різних компонентів верби є відносно високою. Лише протягом першого тижня спостерігається чітка диференціація питомої активності ОВТ в її різних частинах: найбільша – у нижній частині ( $555 \text{ Бк} \times \text{дм}^{-3}$ ), менша – в середній ( $382 \text{ Бк} \times \text{дм}^{-3}$ ) та найнижча – у верхній частині ( $131 \text{ Бк} \times \text{дм}^{-3}$ ). Питома активність тут наводиться в перерахунку на  $1 \text{ дм}^3$  води, виділеної при спалюванні деревини. У подальшому активність  $^3\text{H}$  у всіх компонентах практично вирівнюється і повільно та поступово спадає зі зменшенням його концентрації у зовнішній воді. Невелика частка органічного зв'язаного тритію по відношенню до його кількості в оточуючій воді (4–7%) (рис. 3) відповідає відносному вмісту водню у деревині та свідчить про «біогеохімічний поріг» на шляху міграції  $^3\text{H}$  з водного середовища живлення до органічної речовини рослин.

Для кількісної оцінки швидкості процесів, що спостерігаються (рис. 3), з позицій хімічної кінетики та термодинаміки, було застосовано придатні математичні моделі, які достовірно їх описують. Як відомо, кінетичні процеси найчастіше протікають за експоненційними законами. Тому саме такі моделі було обрано нами для обробки отриманих

результатів. Одностадійний процес зменшення концентрації тритію у водному середовищі живлення (AFS) описується експоненційним рівнянням вигляду:

$$[{}^3\text{H}]_{\text{AFS}} = A_i e^{-k_1 t} \quad (1),$$

де  $[{}^3\text{H}]_{\text{AFS}}$  – поточна питома концентрація тритію у водному середовищі живлення,  $\text{Бк} \times \text{дм}^{-3}$ ;

$A_i$  – початкова концентрація тритію у водному середовищі живлення,  $\text{Бк} \times \text{дм}^{-3}$ ;

$k_1$  – константа швидкості виведення тритію з системи біогенним потоком,  $\text{с}^{-1}$ .

Двостадійні процеси поглинання тритію через кореневу систему та пори кори, вирівнювання його концентрації у внутрішньоклітинному соку внаслідок транспіраційно-асиміляційного потоку води через водопровідні тканини рослин, асиміляцію в органічно зв'язану форму, вилучення внаслідок випаровування в атмосферу через продихи листя описуються біекспоненційним рівнянням вигляду:

$$[{}^3\text{H}]_{\text{IS, OBT}} = A_{\text{IS, OBT}} e^{-k_1 t} (1 - e^{-k_{2,3,4} t}), \quad (2),$$

де  $[{}^3\text{H}]_{\text{IS, OBT}}$  – поточна питома концентрація тритію у внутрішньоклітинних соках (IS) та органічно зв'язаній формі (OBT) у перерахунку на  $1 \text{ дм}^3$  води, що утворилася при спалюванні деревини,  $\text{Бк} \times \text{дм}^{-3}$ ;

$A_{\text{IS, OBT}}$  – максимальна питома концентрація тритію у відповідній біологічній формі,  $\text{Бк} \times \text{дм}^{-3}$ ;

$k_1$  – константа швидкості процесу вилучення тритію з системи або відповідної біологічної форми,  $\text{с}^{-1}$ ;

$k_2$  – константа швидкості процесу акумуляції тритію у відповідній біологічній формі,  $\text{с}^{-1}$ .

Розраховані за допомогою програми STATISTICA методом ітерації параметри цих процесів зведено в табл. 1.

Очевидно, що швидкість та обсяги міграції тритію з водного середовища живлення у внутрішньоклітинний сік рослин та, відповідно, в органічно зв'язану форму, зменшуються від нижньої до верхньої частини саджанця. Це пояснюється впливом гравітаційного чинника, оскільки у воду занурена лише нижня частина рослини. Цікаво відзначити, що константа швидкості надходження водної форми тритію в листя в межах 3% співпадає з розрахованою для різних частин саджанця верби константою швидкості його надходження до внутрішньоклітинного соку деревини (табл. 1).

Тритій є зручним і надзвичайно точним маркером, який дозволяє кількісно відстежувати динаміку водного потоку в рослинах. На підставі

отриманих результатів можна розрахувати швидкість та обсяги внутрішньоклітинного соку, що рухається всередині рослини (табл. 3).

**Таблиця 1.** Параметри процесів біогеохімічної міграції тритію  
**Table 1.** Parametrization of Tritium biogeochemical migration

| Процес                                                                              | Форма  | Параметри              |                                  |                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------|------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
|                                                                                     |        | A, Бк×дм <sup>-3</sup> | k <sub>1</sub> , с <sup>-1</sup> | k <sub>2</sub> , с <sup>-1</sup> |
| Вичерпання (винесення біогенним потоком) у водному середовищі живлення (рівняння 1) | AFS    | 5405                   | 3,87×10 <sup>-8</sup>            | –                                |
| Надходження до внутрішньоклітинного соку деревини (рівняння 2)                      | IS(B)  | 5137                   | 3,87×10 <sup>-8</sup>            | 2,36×10 <sup>-6</sup>            |
|                                                                                     | IS(M)  | 5196                   | 3,87×10 <sup>-8</sup>            | 2,08×10 <sup>-6</sup>            |
|                                                                                     | IS(T)  | 5125                   | 3,87×10 <sup>-8</sup>            | 1,59×10 <sup>-6</sup>            |
| Надходження до внутрішньоклітинного соку листя (рівняння 2)                         | IS(L)  | 3739                   | 3,87×10 <sup>-8</sup>            | 2,02×10 <sup>-6</sup>            |
| Акумуляція в органічно зв'язаній формі (рівняння 2)                                 | OBT(B) | 471                    | 1,69×10 <sup>-7</sup>            | 2,71×10 <sup>-5</sup>            |
|                                                                                     | OBT(M) | 418                    | 1,32×10 <sup>-7</sup>            | 8,05×10 <sup>-6</sup>            |
|                                                                                     | OBT(T) | 367                    | 1,18×10 <sup>-7</sup>            | 1,70×10 <sup>-6</sup>            |

Примітка: AFS – aqueous feeding solution (водне середовище живлення), IS – intercellular sap (внутрішньоклітинний сік), OBT – organically bounded Tritium (органічно зв'язаний тритій); частини саджанця: B – bottom (нижня), M – middle (середня), T – top (верхня), L – leaves (листя).

До початку експерименту в кожному саджанці була тільки протієва вода (7 Бк×дм<sup>-3</sup>), яка входила до складу його соку. Після початку дослідів тритійована вода з водного середовища живлення через кореневу систему та кору нижньої (зануреної) частини рослини почала надходити до внутрішньоклітинного соку (IS), змішуватись із протієвою водою і далі транспіраційним потоком підійматися вгору. Частку води, що надійшла з середовища живлення (M<sub>AFS</sub>), в цій суміші можна розрахувати за формулою (3), у відсотках:

$$M_{AFS} = 100\% \cdot \frac{A_{IS}}{A_{AFS}}, \quad (3),$$

де A<sub>IS</sub>, (Бк×дм<sup>-3</sup>) – експериментально знайдена активність води у внутрішньоклітинному соку, будь-якої частини рослини;  
A<sub>AFS</sub>, (Бк×дм<sup>-3</sup>) – активність водного середовища живлення на час відбору біомаси (5262 Бк×дм<sup>-3</sup> через один тиждень після початку експерименту).

Просторові розміри та масові характеристики досліджених компонентів, використані для розрахунків, наведено в табл. 2.

Швидкість переміщення фронту тритію по стовбуру висхідним потоком, розрахована з цих даних, становить близько 12 см на добу (1,4×10<sup>-6</sup> м×с<sup>-1</sup>). Крім того, через молоді гілки тритій проникає також і до листя, яке знаходиться в середньому на відстані 23 см від стовбура. В такому випадку швидкість підйому внутрішньоклітинного соку до листя становитиме 15.1 см/добу (1,75×10<sup>-6</sup> м×с<sup>-1</sup>).

Кількість води, котра з середовища живлення через кореневу систему та кору поглинається рослиною, становить близько 270 г протягом тижня (4,5 мг×с<sup>-1</sup>). Процес всмоктування води з середовища живлення через корені та пори кори відбувається внаслідок випаровування води в процесі транспірації через листя. Тому обидва процеси повинні характеризуватись приблизно однаковими показниками. У даному експерименті зменшення кількості води в ємності унаслідок транспірації за перший тиждень становило 205 г за тиждень, тобто 3,4 мг×с<sup>-1</sup>. Відносна похибка оцінки двома різними методами у 28 % – досить точне співпадіння, враховуючи технічні складності вимірювання точної кількості води в 77-літровій ємності разом із живцями. Очевидно, що визначення швидкості транспірації води за допомогою тритієвого маркера є більш точним.

Потужність всього транспіраційного потоку (ТС – Transpiration Capacity) в рослині можна також розрахувати двома шляхами. Перший – на основі знайденої величини швидкості переміщення фронту тритію, яка становить 15.1 см×доба<sup>-1</sup>. Якщо взяти середню частину живця (27 см, в якій знаходився 101 г води (табл. 2)), то за добу стовпчик соку в ньому підніметься на 15,1 см і його маса буде становити (15.1×101)/27 = 56.4 г. Таким чином, ТС становить 56.4 г×доба<sup>-1</sup> (9,3×10<sup>-5</sup> г×с<sup>-1</sup>). Другий шлях ґрунтується на тому факті, що за перший тиждень частка тритієвої води встигла піднятися по всій рослині від коренів до листя. Очевидно, що разом з нею підіймалась і протієва вода, яка вже була в рослині. Тому, можна вважати, що загальна

кількість внутрішньоклітинного соку рослини (як сума маси соку в кожному компоненті саджанця) за перший тиждень і є потужністю всього транспіраційного струму  $TC = 176+101+100+39 = 416$  г на тиждень  $= 59.4$  г×доба<sup>-1</sup> ( $9,8 \times 10^{-5}$  г×с<sup>-1</sup>). Відносна похибка цих двох оцінок становить 5,2%,

що визначає високу достовірність отриманих результатів. Низхідний асиміляційний потік, згідно з літературними даними [6,7], становить лише 0,2% від транспіраційного і тому в розрахунках не урахувався.

**Таблиця 2.** Просторові розміри та вага компонентів верби  
**Table 2.** Spatial dimensions and weight of willow tissues

| Параметри                                    | Компоненти саджанця верби |          |      |       |
|----------------------------------------------|---------------------------|----------|------|-------|
|                                              | Низ                       | Середина | Верх | Листя |
| Довжина компонента, см                       | 27.5                      | 27       | 28   | 23    |
| Відстань від верхівки до низу компонента, см | 27.5                      | 54.5     | 82.5 | 105.5 |
| Відстань від середини компонента до низу, см | 13.75                     | 41       | 68.5 | 94.0  |
| Кількість IS, г                              | 176                       | 101      | 100  | 39    |
| $A_{IS}$ , Бк×дм <sup>-3</sup>               | 3939                      | 3635     | 2708 | 2237  |
| $M_{AFS}$ , %                                | 74.9                      | 69.1     | 51.5 | 42.5  |
| $M_{AFS}$ , г                                | 131.7                     | 69.8     | 51.5 | 16.6  |

### Висновки

До 70% тритію, що поглинається рослинами з водного середовища живлення, бере участь у транспіраційно-асиміляційному циклі через водопровідні тканини рослин, близько 30% випаровується через листя в атмосферу.

Вода середовища живлення з великою швидкістю ( $1,6 \pm 28\%$  мг×с<sup>-1</sup>) підіймається транспіраційним потоком угору по рослині. Протягом двох тижнів концентрація тритію у рослинному соку різних частин стовбура практично вирівнюється.

Саме в листі в процесі фотосинтезу відбувається основний процес фракціонування ізотопів водню. Рівень тритію в листі унаслідок транспірації в атмосферу через продиhi та кутикули істотно нижчий (на 29%), ніж у стовбурі.

Отримані дані свідчать про «пороговий» механізм асиміляції тритію в органічній фазі рослин та циклічність процесів міграції у водній фазі живої речовини. Концентрація органічно зв'язаного тритію досягає максимального значення (7% від активності води середовища живлення) протягом першого тижня, у подальшому знижується і вирівнюється у всіх частинах стовбура.

За допомогою радіоактивного маркера – тритійованої води встановлено питому швидкість висхідного ксилемного потоку води в саджанцях верби білої, яка становить  $(9,5 \pm 0,3) \times 10^{-5}$  г×с<sup>-1</sup>.

### Література

1. Бобков В. М., Долін В. В. Ізотопний обмін тритію в процесі вегетації верби. Збірник наукових праць Інституту геохімії навколишнього середовища НАН України: Серія "Геохімія та екологія". Київ, 2016. Вип.25. С.49- 55.
2. Dolin V. V., Bobkov V. M., Pushkarev O. V., Koshliakova T. O. Isotopic Effects of Tritium during the Growth of White Willow // *Universal Journal of Geoscience*. – 2018. V. 6(6). P. 175-183.
3. Рэй Ф. Эвэрт *Анатомия растений Эзау. Меристемы, клетки и ткани растений: строение, функции и развитие*, пер. с англ. под ред. канд. биол. наук А.В. Степановой.- М.: Лаборатория знаний, 2015, 600 с.
4. Строение проводящих тканей: <http://biofile.ru/bio/21756.html>
5. Проводящие ткани. ботаника.html <http://botanika-olgacheva.odn.org.ua/B5703Part15-48.html>
6. Полевой В.В. *Физиология растений: Учеб. для биол. спец. вузов*. М.: Высш. шк., 1989. 464 с.
7. Эржапова Р.С., Эржапова Р.С. *Физиология растений. Водный режим растений. Учебное пособие*. Грозный: Издательство ЧГУ, 2015. 128 с.

### References

1. Bobkov V. M., Dolin V. V. (2016). *Zbirnyk naukovykh prats' Instytutu heokhimiyi navkolyshn'oho seredovyshcha NAN Ukrayiny*, **25**, pp.49- 55.
2. Dolin V. V., Bobkov V. M., Pushkarev O. V., Koshliakova T. O. (2018), *Universal Journal of Geoscience*. **6(6)**, pp. 175-183.
3. Réy F. Évert (2015), Moscow: Laboratorya znanyu, 600 p.
4. Stroenye provodyashchyykh tkaney. Available at: <http://biofile.ru/bio/21756.html>
5. Provodyashchyye tkany: botanyka. Available at: <http://botanika-olgacheva.odn.org.ua/B5703Part15-48.html>
6. Polevoy V.V. (1989). Moscow: Vyssh. shk., 464 p.
7. Érzhapova R.S., Érzhapova R.S. (2015), Hroznyy: Yzdatel'stvo CHHU. 128 p.

**PECULARITIES OF THE TRITATED WATER TRANSPIRATION FLUX DURING WILLOW VEGETATION**

**Dolin V.V.**, Hab. Dr. Geol., Prof., State Institution "The Institute of Environmental Geochemistry of National Academy of Sciences of Ukraine", ORCID:0000-0001-6174-2962, vdolin@ukr.net

**Bobkov V.M.**, Ph.D. (Chemistry), Senior Researcher, State Institution "The Institute of Environmental Geochemistry of National Academy of Sciences of Ukraine", IGNS\_Bobkov@nas.gov.ua

*In the greenhouse experiment in time dynamics the peculiarities of tritiated water transpiration flux from an aqueous feeding solution to the white willow (*Salix alba* L.) tissues were studied. The experimental results are analyzed from the standpoint of chemical kinetics. From the experimental data, the rate constants of the processes of tritium removal by the biogenic flow from the aquatic food environment, its entry into the intracellular sap of wood and leaves, and transformation into an organically bound form were calculated. Up to 70% of tritium absorbed by plants from the aqueous feeding solution takes part in the transpiration-assimilation cycle through the aquatic tissues of the plants; about 30% evaporates through the leaves into the atmosphere. The water of the nutrient medium rises up through the plant by the transpiration flux at high speed ( $1.6 \pm 28\% \text{ mg} \times \text{s}^{-1}$ ) rises along the xylem by the plant. Within two weeks, the concentration of tritium in the intercellular sap of different parts of the trunk is almost equalized. In the leaf during photosynthesis, the main process of fractionation of hydrogen isotopes occurs. The tritium concentration in the leaves is significantly lower (29%) than in the trunk due to transpiration into the atmosphere through the stomata and cuticle. The obtained data testify to the "threshold" mechanism of tritium assimilation in the organic phase of the plants and the cyclicality of the migration processes in the aqueous phase of the living matter. The organically bound tritium concentration reaches a maximum value (7% of the activity of water in the aqueous feeding solution) during the first week, then decreases and equalizes in all parts of the trunk. Using a radioactive marker (tritiated water) the specific velocity of the ascending xylem flux of water in the white willow seedlings is assessed to  $(9.5 \pm 0.3) \times 10^{-5} \text{ g} \times \text{s}^{-1}$*

**Keywords:** tritiated water, white willow, transpiration, intercellular sap, organically bounded tritium, vapors from leaves, concentration, rate constant.