

УДК 543.423:574.23

Пророк В. В.¹, к.ф.-м.н., с.н.с.,
Вайт Ф. Дж.², PhD., проф.,
Даценко О. І.³, к.ф.-м.н., с.н.с.,
Булавін Л. А.⁴, д.ф.-м.н., проф.,
Мельниченко Л. Ю.⁵, к.ф.-м.н., с.н.с.,
Поперенко Л. В.⁶, д.ф.-м.н., проф.

V. V. Prorok¹, PhD, Sen. Sci. Res.,
P. J. White², PhD, Prof.,
O. I. Dacenko³, PhD, Sen. Sci. Res.,
L. A. Bulavin⁴, Dr. Sci., Prof.,
L. Yu. Melnychenko⁵, PhD, Sen. Sci. Res.,
L. V. Poperenko⁶, Dr. Sci., Prof.

Канали надходження калію та цезію-137 до редису у природних умовах при недостатній вологості ґрунту

Mechanisms of potassium and cesium-137 uptake by radish in the field under water-stressed conditions

^{1,3,4,5,6} Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 01601, м. Київ, вул. Володимирська 64/13, e-mail: ¹prorok@univ.kiev.ua
²The James Hutton Institute, Invergowrie, Dundee DD2 5DA, Scotland (UK)

^{1,3,4,5,6} Taras Shevchenko National University of Kyiv, 01601, Kyiv, Volodymyrska st. 64/13, e-mail: ¹prorok@univ.kiev.ua
²The James Hutton Institute, Invergowrie, Dundee DD2 5DA, Scotland (UK)

Вивчалися канали надходження калію та ¹³⁷Cs у рослини на прикладі редису. Показано, що при концентрації розчиненого калію у ґрунті $C_K > 2 - 4 \text{ мкг/см}^3$ надходження калію та цезію до рослини, як правило, відбувається по низькоселективних калієвих каналах. При $0,5 \text{ мкг/см}^3 < C_K < 2-4 \text{ мкг/см}^3$ калій переходить у рослину також і по високоселективному калієвому каналу. При $C_K < 0,5 \text{ мкг/см}^3$ рослина починає використовувати ще один високоселективний калієвий канал.

Ключові слова : йонні канали, калій, цезій-137, ґрунтовий розчин

The mechanisms of potassium (K) and cesium (¹³⁷Cs) uptake by plants were studied using radish as an example. The investigations were performed at three experimental field sites within the 10 km Zone of the Chernobyl Nuclear Power Plant in 2012 and 2013. Radish seeds were sown, and plants and their corresponding soil solutions were sampled, several times during each growing season. The value $r = (^{137}\text{Cs}/\text{K})_p / (^{137}\text{Cs}/\text{K})_{ss}$ was estimated for each paired sample. Here, $(^{137}\text{Cs}/\text{K})_p$ is the quotient of ¹³⁷Cs and K concentrations in the plant and $(^{137}\text{Cs}/\text{K})_{ss}$ is the same for the corresponding soil solution. It was observed that potassium and cesium entered plant roots, as a rule, through a complement of transporters with low selectivity when the concentration of dissolved potassium (C_K) in the soil solution was greater than 2 to 4 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$. In this case the value of r was near 1. However, when C_K was between 0.5 and 2 to 4 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$, potassium also appeared to enter plant roots through highly-selective potassium transporters, whilst cesium entered roots only through the transporters with low selectivity. In this case the value of r was much less than 1. When C_K was less than 0.5 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$, cesium appeared to enter roots through a complement of transporters with greater selectivity for cesium than potassium. The value of r in this case could exceed 1.

Key words: ion channels, potassium, cesium-137, soil solution

Статтю представив академік НАН України, д.ф.-м.н., проф. Булавін Л.А.

Вступ

У роботах [1,2] показано, що концентрація ¹³⁷Cs у рослинах даного виду, що виростили на тій самій забрудненій ¹³⁷Cs ділянці, але при різних погодних умовах, може інколи відрізнятись у десятки разів. Ці результати доводять, що нема однозначного зв'язку між концентрацією ¹³⁷Cs у рослині та характеристиками ґрунту, на якому виростила ця рослина. Причиною вказаної різниці є зміна параметрів ґрунтового розчину при зміні

погодних умов. ¹³⁷Cs та елементи макроживлення рослин у залежності від параметрів ґрунтового розчину, властивостей рослини та інших причин можуть надходити до рослини по різних каналах – або по низькоселективних, або по високоселективних, або по тих чи інших каналах одночасно з різним вкладом кожного каналу. Багато дослідників (див., наприклад оглядові роботи [3,4]), намагаються пов'язати надходження цезію до рослини з надходженням

калію до неї. На сьогоднішній день вже ніхто не ставить під сумнів існування щонайменше двох систем (каналів) надходження калію до рослин – low affinity (низькоспоріднена) та high affinity (високоспоріднена). Як правило, надходження калію до рослини відбувається по низькоспорідненому (неселективному) та високоспорідненому (селективному) каналам одночасно. Вважається, що низькоспоріднений канал (канали) переважає при високій концентрації калію у ґрунтовому розчині (вищій за 12-39 мкг/см³), а високоспоріднений при низькій (меншій за 12-39 мкг/см³) [3,4].

У роботі [5] описані кілька типів мембранних неселективних катіонних каналів. Це канали, що активуються деполяризацією, гіперполяризацією, іонами Ca²⁺, механічною напругою та канали, що нечутливі до електричної напруги.

Згідно з [6], Cs може попадати до рослини через входні калієві канали, через нечутливі до електричної напруги катіонні канали, через H⁺-насоси, через кальцієві канали. Може виходити у ґрунт через коріння рослини через вихідні калієві канали. У реальних умовах більша частина Cs попадає з ґрунту до клітин кореня через нечутливі до електричної напруги неселективні катіонні канали.

Погляди різних дослідників щодо каналів надходження цезію до рослини інколи не узгоджуються. На жаль, більшість наведених вище результатів – це результати експериментів з інтактними рослинами. А тому не можна ці результати механічно переносити на рослини, що виростають у природних умовах. У роботах [7,8] після аналізу експериментальних результатів, що отримані в природних умовах, показано, що добуток концентрації K у ґрунтовому розчині на вміст вологи h у одиниці об'єму ґрунту $C_K = K \cdot h$ набагато точніше вказує на момент початку домінування того чи іншого каналу, ніж концентрація калію у ґрунтовому розчині. При концентрації розчиненого калію у ґрунті $C_K > 2-4$ мкг/см³ концентраційні коефіцієнти рослина / ґрунтовий розчин для калію й для цезію є величинами одного порядку. При концентрації розчиненого калію у ґрунті $C_K < 2$ мкг/см³ концентраційний коефіцієнт рослина / ґрунтовий розчин для калію стає більшим, ніж для цезію – інколи у 40-50 разів. Як правило, $C_K < 2$ мкг/см³ при значній недостатці вологи у ґрунті. Вміст цезію у рослинах при цьому стає значно меншим, ніж у випадку $C_K > 2-4$ мкг/см³. Надходження цезію залишається пропорційним концентрації розчиненого у ґрунті цезію. Цезій надходить до

рослини по тому ж самому низькоселективному каналу (каналах), у той час як для забезпечення себе калієм рослина у цьому випадку використовує також і інший – високоселективний канал.

Мета цієї роботи – більш ретельно дослідити надходження цезію та калію до рослин у природних умовах при нестачі вологи у ґрунті.

Результати досліджень та їх обговорення

Дослідження проводилися на трьох експериментальних ділянках, розташованих у 10-кілометровій зоні відчуження Чорнобильської АЕС: ділянка Д – торф'яний ґрунт; ділянка Б – піщаний ґрунт; Б2 – піщаний ґрунт із дещо відмінним від ґрунту Б складом. Вміст цезію-137 у досліджуваних ґрунтах складав: Д – 15 200 Бк/кг, Б – 16 900 Бк/кг, Б2 – 10 600 Бк/кг. Гамафон на експериментальних ділянках дорівнював: Д – 200 мР/год., Б – 380 мР/год., Б2 – 350 мР/год. Густина ґрунту Д – 0,85 г/см³, ґрунту Б – 1,41 г/см³, ґрунту Б2 – 1,42 г/см³.

Для дослідження надходження цезію та калію з ґрунту до рослин ми висівали на цих експериментальних ділянках насіння редису як швидкозростаючої рослини. Насіння висівалося по декілька разів кожного вегетативного сезону 2012 та 2013 років. Досліджувалися зразки рослин та відповідного ґрунтового розчину. Ми відбирали зразки рослин та ґрунтів по кілька разів кожного сезону. Але ми не відбирали паростків, вони продовжували рости далі. Рослини відбиралися до стадії їх цвітіння. Потім всі ці рослини висушувалися. З ґрунту екстрагувався ґрунтовий розчин за допомогою центрифуги ОС-6М. Частота обертання вала приводу складала до 6000 обертів на хвилину. Центрифугований розчин фільтрувався крізь паперовий фільтр (діаметр пор 1-3 мкм), а потім крізь мембранний фільтр (діаметр пор 0,1 мкм). ґрунтовий розчин після фільтрування був прозорим. Для консервації цього розчину ми додавали у нього концентровану азотну кислоту у пропорції 1 мл кислоти на 500 мл ґрунтового розчину та нагрівали його до кипіння. Ми визначали вологість ґрунту h як відношення маси води у зразку до маси сухого ґрунту в цьому зразку з експериментальною похибкою 10%. Концентрація ¹³⁷Cs у зразках визначалася за допомогою гама-спектрометра з напівпровідниковим детектором HPGe ORTEC GMX40P4-83-RB РОРТОР з експериментальною похибкою 10%. Концентрація калію у зразках вимірювалася атомно-абсорбційним методом на спектро-

фотометрі С-115-М1 при довжині хвилі $\lambda = 766,5$ нм із похибкою 5%. Для всіх досліджуваних зразків рослин визначалася величина $r = (^{137}\text{Cs}/\text{K})_p / (^{137}\text{Cs}/\text{K})_{ss}$, де $(^{137}\text{Cs}/\text{K})_p$ – відношення концентрації ^{137}Cs та К у рослині, $(^{137}\text{Cs}/\text{K})_{ss}$ – відношення концентрації ^{137}Cs та К у відповідному ґрунтовому розчині. Легко показати, що величина r є також відношенням концентраційних коефіцієнтів рослина / ґрунтовий розчин для цезію та калію.

На рис. 1. – рис. 3 приведені отримані експериментальні результати для величин r та C_K для ділянок Д, Б та Б2.

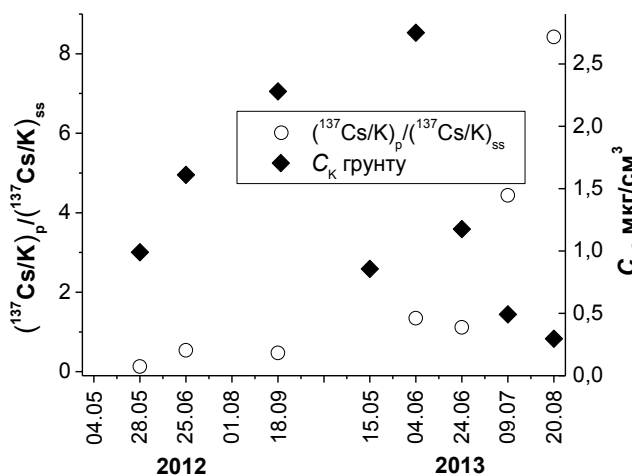


Рис. 1. Відношення $(^{137}\text{Cs}/\text{K})_p / (^{137}\text{Cs}/\text{K})_{ss}$ та вміст розчиненого К у ґрунті для ділянки Д

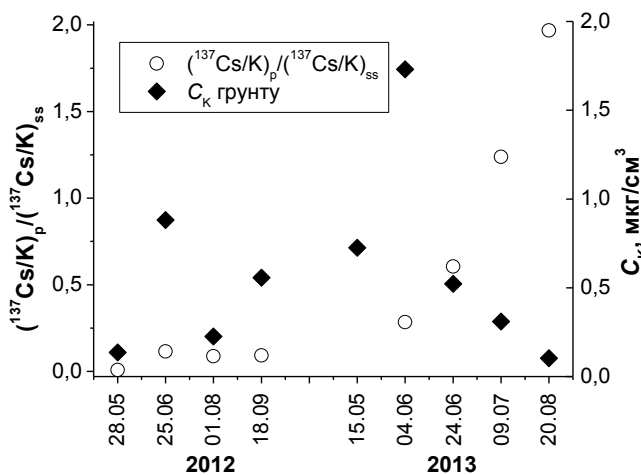


Рис. 2. Відношення $(^{137}\text{Cs}/\text{K})_p / (^{137}\text{Cs}/\text{K})_{ss}$ та вміст розчиненого К у ґрунті для ділянки Б

Як уже зазначалося, існує кілька каналів надходження калію та цезію до рослин [3,4]. Ми не можемо їх однозначно ідентифікувати за результатами наших досліджень. Але можна встановити, який канал надходження калію – високоселективний чи низькоселективний – переважає у кожному конкретному випадку. З

отриманих нами експериментальних результатів можна побачити, що для усіх досліджуваних ґрунтів та рослин при концентрації розчиненого калію у ґрунті (добуток концентрації К у ґрунтовому розчині на вміст води у одиниці об'єму ґрунту) $C_K > 2 - 4$ мкг/см³ величина r змінюється не більше, ніж у кілька разів, тобто концентраційні коефіцієнти рослина / ґрунтовий розчин для цезію та калію приблизно рівні. Таким чином, при концентрації розчиненого калію у ґрунті $C_K > 2 - 4$ мкг/см³ надходження калію та цезію до рослини, як правило, відбувається по низькоселективним каналам. Це підтверджує висновки [7,8].

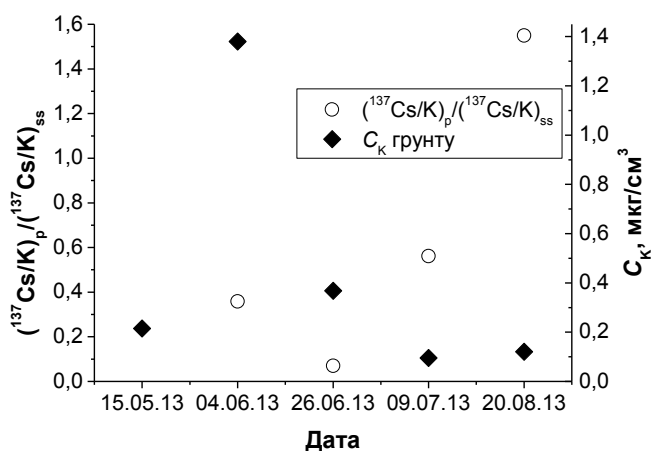


Рис. 3. Відношення $(^{137}\text{Cs}/\text{K})_p / (^{137}\text{Cs}/\text{K})_{ss}$ та вміст розчиненого К у ґрунті для ділянки Б2

При концентрації розчиненого калію у ґрунті $0,5 \text{ мкг/см}^3 < C_K < 2 - 4 \text{ мкг/см}^3$ величина r зменшується – концентраційний коефіцієнт рослина / ґрунтовий розчин для калію стає набагато більшим, ніж для цезію. Концентрація цезію у рослинах при цьому стає у багато разів меншою. Надходження цезію залишається приблизно пропорційним концентрації розчиненого у ґрунті цезію (добутку концентрації цезію у ґрунтовому розчині та вмісту ґрунтового розчину в одиниці об'єму ґрунту). Калій переходить у рослину також і по високоселективному каналу. Це також підтверджує висновки [7,8].

Але, як це можна побачити з рис.1-3, при $C_K < 0,5 \text{ мкг/см}^3$ величина r знову починає інтенсивно зростати й може значно перевищувати 1. Вміст цезію в рослинах теж стає набагато більшим, ніж у попередньому випадку. Ми вважаємо, що в умовах, коли $C_K < 0,5 \text{ мкг/см}^3$, рослина починає використовувати ще один високоселективний канал. Надходження цезію до рослини по цьому

каналу перевищує надходження калію. Тому вміст цезію в рослині збільшується.

Висновки

При концентрації розчиненого калію у ґрунті $C_K > 2 - 4$ мкг/см³ надходження калію та цезію до рослини, як правило, відбувається по низькоселективних калієвих каналах. Величина r при цьому близька до одиниці.

При концентрації розчиненого калію у ґрунті $0,5$ мкг/см³ $< C_K < 2-4$ мкг/см³ калій переходить у рослину також і по високоселективному калієвому каналу. Цезій у цьому випадку переходить в рослину тільки по

низькоселективному каналу. Величина r при цьому набагато менша за одиницю.

При концентрації розчиненого калію у ґрунті $C_K < 0,5$ мкг/см³ рослина починає використовувати ще один високоселективний калієвий канал. Надходження цезію до рослини по цьому каналу є доволі значним. Величина r при цьому може перевищувати одиницю.

Робота виконана за фінансової підтримки Українського Науково-Технологічного Центру (проект УНТЦ 5439).

Список використаних джерел

1. Пророк В.В. Залежність вмісту ¹³⁷Cs у рослині від параметрів ґрунту / В.В. Пророк, К.Ф.В. Масон, С.Ф. Тимофеев та ін. // Вісник Київського ун-ту, сер. фіз.-мат., 2004. – Вип. 3. – С. 407-416.
2. Prorok V.V. The transfer of dissolved ¹³⁷Cs from soil to plants [Електронний ресурс] / V.V. Prorok, C.F.V. Mason, V.A. Ageyev, et al. // Proc. of WM'06. Session 66. Tucson (Arizona), 26 February – 2 March 2006. – Tucson, 2006. – Режим доступу: WM06/66.html
3. Maathuis F.J.M. Mechanisms of potassium absorption by higher plant roots / F.J.M. Maathuis and D. Sanders // *Physiol. Plant.* – 1996. – Vol.96, No 1. – P.158-168.
4. Maathuis F.J.M. Roles of High Plant K⁺ Channels / F.J.M. Maathuis, A.M. Ichida, D. Sanders et.al. // *Plant Physiol.* – 1997. – Vol. 114, No 4. – P.1141-1149.
5. Demidchik V. Nonselective Cation Channels in Plants / V. Demidchik, R.J. Davenport and M. Tester // *Annu. Rev. Plant Biol.* – 2002, Vol. 53, No 1. – P. 67-107.
6. White P.J. Mechanisms of caesium uptake by plants / P.J. White and M.R. Broadley // *New Phytol.* – 2000. – Vol. 147, No 2. – P. 241-256.
7. Пророк В.В. Механізми надходження калію та цезію до рослини / В.В. Пророк // Вісник Київського ун-ту. Сер. фіз.-мат. науки. – 2007. – Вип.4. – С. 365-368.
8. Булавін Л.А. Фактори, що визначають концентрацію ¹³⁷Cs у рослині на забрудненому ґрунті у природних умовах / Л.А. Булавін, В.В. Пророк, Л.В. Поперенко // Доповіді НАН України. – 2011. – №1. – С. 173-177

References

1. PROROK, V. et al. (2004) Dependence of ¹³⁷Cs content in the plant on the soil parameters. *Bullet. Univ. Kyiv. Ser.: Phys. & Math.* (3). p. 407-416.
2. PROROK, V. et al. (2006) The transfer of dissolved ¹³⁷Cs from soil to plants. In *Proc. of WM'06. Session 66.*, 26th February to 2nd March 2006 [Online]. Tucson. – Available from: WM06/66.html
3. MAATHUIS, F. and SANDERS, D. (1996) Mechanisms of potassium absorption by higher plant roots. *Physiol. Plant.* 96 (1). p.158-168.
4. MAATHUIS, F. et al. (1997) Roles of High Plant K⁺ Channels. *Plant Physiol.* 114 (4). P.1141-1149.
5. DEMIDCHIK, V., DAVENPORT, R. and TESTER, M. (2002) Nonselective Cation Channels in Plants. *Annu. Rev. Plant Biol.* 53 (1). p.67-107.
6. WHITE, P. and BROADLEY, M. (2000) Mechanisms of caesium uptake by plants. *New Phytol.* 147 (2), p.241-256.
7. PROROK, V. (2007) Mechanisms of potassium and caesium uptake by plants. *Bullet. Univ. Kyiv. Ser.: Phys. & Math.* (4). p.365-368.
8. BULAVIN, L. PROROK, V. and POPERENKO, L. (2011) Factors defining ¹³⁷Cs concentration in the plant at polluted land under natural conditions *Reports of NAS of Ukraine.* (1). p.173-177.

Надійшла до редколегії 21.06.14 р.