



УДК 631.95:543.423

© 2011

Академік НАН України Л. А. Булавін, В. В. Пророк, Л. В. Поперенко

### Фактори, що визначають концентрацію $^{137}\text{Cs}$ у рослині на забрудненому ґрунті в природних умовах

*Проведено аналіз експериментальних даних за вмістом  $^{137}\text{Cs}$  й К у рослинах та у відповідному ґрунтовому розчині в природних умовах на кількох ділянках у Зоні відчуження ЧАЕС, які розглядаються. В усі досліджувані рослини на всіх ділянках  $^{137}\text{Cs}$  надходить переважно по низькоселективному катіонному каналу незалежно від складу ґрунтового розчину та вологості ґрунту. Якщо рослина не відчуває нестачі калію, К надходить у рослини переважно по низькоселективному каналу. При нестачі калію в рослині вона крім низькоселективного використовує також високоселективний канал надходження К. При цьому відбувається сильна дискримінація  $^{137}\text{Cs}$ .*

Прогнозування концентрації цезію в рослині певного виду, що росте на забрудненій ділянці з відповідним типом ґрунту, є достатньо складним. Чимало дослідників намагалися встановити однозначний зв'язок концентрації  $^{137}\text{Cs}$  у рослині з забрудненістю та типом ґрунту, на якому ця рослина росла (див., наприклад, огляд [1]). На сьогодні, незважаючи на історію подібних досліджень, не існує надійної методики прогнозування надходження  $^{137}\text{Cs}$  з ґрунту в рослини, що й підтверджують останні публікації (див., наприклад, [2]). Експериментально встановлені зв'язки є скоріше кореляціями, які інколи мають місце, а інколи ні. Більше того, в роботах [3–5] показано, що концентрація  $^{137}\text{Cs}$  у рослинах певного виду, що вирости на даній ділянці з певним типом ґрунту, але в різний час, може іноді відрізнятись в десятки разів. Іншими словами, задача прогнозування концентрації  $^{137}\text{Cs}$  у рослині не має однозначного розв'язку. Причиною вказаної різниці в першу чергу є залежність надходження  $^{137}\text{Cs}$  та елементів живлення рослин від параметрів ґрунтового розчину, які весь час змінюються. На нашу думку, задачу прогнозування надходження  $^{137}\text{Cs}$  у рослину, що росте на забрудненій ділянці з певним типом ґрунту, доцільно поділити на кілька задач: прогнозування складу ґрунтового розчину на відповідній ділянці як функції часу та погодних умов; прогнозування надходження  $^{137}\text{Cs}$  у певну рослину у відповідній стадії росту рослини залежно від параметрів ґрунтового розчину та прогнозування надходження  $^{137}\text{Cs}$  у рослину залежно від виду рослини, інших факторів.

Багато дослідників намагаються пов'язати надходження  $^{137}\text{Cs}$  у рослину з надходженням К до неї. На сьогодні вже ніхто не ставить під сумнів існування щонайменше двох

систем (каналів) надходження К у рослини — low affinity — низькоспоріднена та high affinity — високоспоріднена (див., наприклад, [6, 7]). Як правило, надходження К у рослину відбувається водночас по низькоспоріднених (низькоселективних) та високоспоріднених (високоселективних) каналах. Вважається, що низькоспоріднені канали є основними за умов високої концентрації К у ґрунтовому розчині (понад 0,039... 0,012 мг/см<sup>3</sup>), а високоспоріднені — за умов низької концентрації (менше 0,039... 0,012 мг/см<sup>3</sup>) [6, 7].

У роботі [8] описано кілька типів мембранних неселективних катіонних каналів. Це канали, що чутливі або нечутливі до електричного поля, канали, що активуються іонами Ca<sup>2+</sup>, механічною напругою.

Як зазначено в публікації [9], цезій може попадати в рослину через вхідні калієві канали, через нечутливі до електричного поля катіонні канали, через H<sup>+</sup>-насоси та кальцієві канали; може виходити в ґрунт по коріннях рослини через вихідні калієві канали. В реальних умовах більша частина <sup>137</sup>Cs попадає з ґрунту в клітини кореня через нечутливі до електричного поля неселективні катіонні канали. У роботах [10, 11] після досліджень *Arabidopsis* було зроблено такі висновки: якщо рослина не відчуває дефіциту К, то більша частина <sup>137</sup>Cs попадає в рослину через нечутливі до електричного поля катіонні канали. При дефіциті К у рослині значна частина <sup>137</sup>Cs попадає в рослину через K<sup>+</sup>-транспортер AtНАК5. <sup>137</sup>Cs може надходити в рослину тільки через калієву транспортну систему, а саме К-транспортер (H<sup>+</sup>-насос) та калієві канали, що діють при різних зовнішніх концентраціях К [12]. К-транспортер дає слабку дискримінацію <sup>137</sup>Cs (зовнішня концентрація К < 0,3 ммоль/л), а при домінуванні калієвих каналів спостерігається сильна дискримінація <sup>137</sup>Cs (велика зовнішня концентрація К).

Мета роботи авторів даного повідомлення — дослідити використання низько- та високоселективних каналів надходження <sup>137</sup>Cs й К у рослини в природних умовах, що, з нашої точки зору, істотно впливає на концентрацію <sup>137</sup>Cs у рослині.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Дослідження проводилися на трьох експериментальних ділянках, розташованих у Зоні відчуження Чорнобильської АЕС: ділянка **А** — дерново-підзолистий середньоопідзолений глейоватий піщаний ґрунт; ділянка **В** — торфово-болотний низинного типу ґрунт; ділянка **С** — дерново-підзолистий середньоопідзолений ґрунт.

Для дослідження надходження Cs та К з ґрунту в рослини ми використовували метод змішаного висіву, що описаний в роботах [3–5]. Вивчалися зразки рослин та відповідного ґрунтового розчину. Для всіх досліджуваних рослин визначалася величина  $r = \frac{(^{137}\text{Cs}/\text{K})_{\text{р}}}{(^{137}\text{Cs}/\text{K})_{\text{г.р}}}$ , де  $(^{137}\text{Cs}/\text{K})_{\text{р}}$  — відношення концентрації <sup>137</sup>Cs й К у рослині,  $(^{137}\text{Cs}/\text{K})_{\text{г.р}}$  — відношення концентрації <sup>137</sup>Cs та К у відповідному ґрунтовому розчині. Відзначимо, що величина  $r$  є також відношенням концентраційних коефіцієнтів рослина : ґрунтовий розчин для <sup>137</sup>Cs й К у цих зразках. Концентрація <sup>137</sup>Cs у зразках визначалася за допомогою  $\gamma$ -спектрометра “Kanberra” з експериментальною похибкою 10%. Концентрацію К у зразках вимірювали оптичним методом за допомогою ІСП-спектрометра “Spectro” з похибкою 0,5%. Більш докладно методику експерименту описано в публікаціях [3–5].

Отримані експериментальні результати для ділянки **А** представлені у табл. 1, з якої видно, що при концентрації розчиненого калію в ґрунті (добуток концентрації К у ґрунтовому розчині та вмісту вологи в одиниці об'єму ґрунту)  $C_{\text{К}} > 0,002...0,004$  мг/см<sup>3</sup> величина  $r$  відрізняється від одиниці не більш ніж у кілька разів, тобто концентраційні коефіцієнти рослина : ґрунтовий розчин для цезію та калію близькі за величиною. При концентрації розчиненого К у ґрунті  $C_{\text{К}} < 0,002...0,004$  мг/см<sup>3</sup> величина  $r$  різко зменшується — кон-

центраційний коефіцієнт рослина : ґрунтовий розчин для калію стає набагато більшим, ніж для цезію — у 50 і більше разів. На ділянці **В** в усіх випадках було  $C_K > 0,002$  мг/см<sup>3</sup>. Величина  $r$  при цьому незначно відрізнялася від одиниці. На ділянці **С** в усіх випадках, крім одного,  $C_K < 0,002$  мг/см<sup>3</sup>, а  $r$  набагато менша одиниці. В одному випадку  $C_K$  становила 0,0045 мг/см<sup>3</sup>, а  $r$  приблизно дорівнювала одиниці. Дані для ділянок **В** й **С** наведені в статтях [13, 14].

Аналіз експериментальних даних дозволяє зробити висновок, що для всіх досліджуваних ґрунтів та рослин у даній стадії росту (до цвітіння) при концентрації розчиненого калію в ґрунті  $C_K > 0,002 \dots 0,004$  мг/см<sup>3</sup>, як правило, переважає надходження К та <sup>137</sup>Cs у рослину по низькоселективних каналах. Надходження <sup>137</sup>Cs залишається приблизно пропорційним концентрації розчиненого в ґрунті цезію (добутку концентрації <sup>137</sup>Cs у ґрунтовому розчині та вмісту ґрунтового розчину в одиниці об'єму ґрунту) незалежно від параметрів ґрунтового розчину, як це було встановлено раніше [3–5]. У випадку  $C_K < 0,002 \dots 0,004$  мг/см<sup>3</sup> для забезпечення себе калієм рослина використовує також й інший — високоселективний канал. Чим менша концентрація розчиненого калію в ґрунті, тим більша частина калію, що надходить у рослину, надходить саме по високоселективному каналу. При низькій вологості ґрунту, коли, як правило, превалює надходження К по високоселективному каналу, концентрація <sup>137</sup>Cs у рослині, як правило, набагато нижча, ніж у випадку значного вмісту ґрунтового розчину в одиниці об'єму ґрунту. Останній випадок особливо характерний для торфового ґрунту. Як відомо, в рослинах, що виростили на цьому ґрунті, спостерігається висока концентрація <sup>137</sup>Cs.

Враховуючи наші спостереження, надходження К по високоселективному каналу іноді переважає при досить високій концентрації К у ґрунтовому розчині (але при малій вологості ґрунту), а іноді переважає надходження К по низькоселективному каналу при досить низькій концентрації К у ґрунтовому розчині (але при великій вологості ґрунту). Добуток

Таблиця 1

$h_1$ , г/см <sup>3</sup>	Дата	Зразок	К, мг/г	<sup>137</sup> Cs, Бк/кг	$r$	$C_K$ , мг/см <sup>3</sup>
0,12	09 черв. 2002	Soil solution	0,0070	8,0	—	—
Те саме	Те саме	<i>Phleum pratense</i>	20,96	5276	0,220	0,00084
0,73	22 черв. 2002	Soil solution	0,0292	8,0	—	—
0,069	Те саме	Roots of <i>raphanus sativus</i>	64,70	1746	0,099	0,00201
Те саме	"	Leaf of <i>raphanus sativus</i>	43,49	2018	0,169	0,00201
"	"	<i>Lepidium sativum</i>	48,30	4540	0,343	0,00201
0,73	14 лип. 2002	Soil solution	0,0282	7,9	—	—
0,17	Те саме	<i>Phleum pratense</i>	12,15	5725	1,682	0,00479
Те саме	"	<i>Stachys palustris</i>	27,67	10206	1,317	0,00479
0,32	08 черв. 2003	Soil solution	0,0214	4,9	—	—
0,018	Те саме	<i>Raphanus sativus</i>	52,34	216	0,018	0,000385
Те саме	"	<i>Lepidium sativum</i>	38,28	265	0,030	0,000385
"	"	<i>Lactuca sativa</i>	52,617	672	0,056	0,000385
"	"	<i>Stachys palustris</i>	29,774	606	0,089	0,000385
0,34	13 лип. 2003	Soil solution	0,0217	3,2	—	—
0,039	Те саме	<i>Lactuca sativa</i>	47,39	585	0,084	0,000846
Те саме	"	<i>Polygonum hydropiper</i>	34,07	679	0,135	0,000846
"	"	<i>Stachys palustris</i>	32,35	1722	0,361	0,000846

Примітка. Ділянка **А**. Вміст води в одиниці об'єму ґрунту  $h_1$ , вміст К й <sup>137</sup>Cs у зразках ґрунтових розчинів та висушених рослин, величина  $r = ({}^{137}\text{Cs}/\text{K})_{\text{р}} / ({}^{137}\text{Cs}/\text{K})_{\text{г.р}}$ , концентрація розчиненого калію в ґрунті  $C_K$ .

концентрації К у ґрунтовому розчині на вміст вологи в одиниці об'єму ґрунту (концентрація розчиненого калію в ґрунті) більш точно вказує на момент початку переважування того чи іншого каналу, ніж концентрація К у ґрунтовому розчині. На нашу думку, превалювання високо- або низькоселективного каналу регулюється самою рослиною, виходячи з її потреб у калії в даний момент. Звичайно, ці потреби корелюють з концентрацією розчиненого калію у ґрунті. Якщо рослині недостатньо К, який надходить по низькоселективному каналу, вона більш активно використовує високоселективний канал. Зауважимо, що потреби рослини в калії зумовлені видом рослини, її стадією росту, концентрацією К у рослині, концентраціями інших елементів живлення в рослині, іншими факторами.

Існує кілька низькоселективних каналів надходження К у рослини [6–8]. За результатами наших досліджень неможливо їх однозначно ідентифікувати. Але можна встановити, який саме канал надходження К — високо- або низьконеселективний — переважає в кожному конкретному випадку. Вірогідно, високоселективні калієві канали, які використовуються досліджуваними рослинами при дефіциті калію, є  $H^+$ -насосами.

Спробуємо пояснити, чому момент початку превалювання високо- або низькоселективного каналу надходження К у рослину при даній концентрації К у ґрунтовому розчині залежить від вмісту вологи в ґрунті. В польових умовах у ґрунті пори повністю або частково заповнені ґрунтовим розчином. Чим більш пористий ґрунт, тим більше ґрунтового розчину він може поглинути. Надходження елементів живлення рослин відбувається через епідерму кореня (див., наприклад, у [15]). Чим більший вміст ґрунтового розчину в одиниці об'єму ґрунту, тим більша площа епідерми кореня контактує з ґрунтовим розчином. Таким чином, з даних, наведених в роботах [3–5, 13, 14], випливає, що чим більша площа епідерми контактує з ґрунтовим розчином, тим більше К й  $^{137}Cs$  надходить у рослину по неселективному пасивному каналу. В деякому наближенні ці величини пропорційні. Тому чим більший вміст ґрунтового розчину в одиниці об'єму ґрунту, тим при меншій концентрації К у ґрунтовому розчині рослина починає відчувати дефіцит калію, а тому починає використовувати високоселективний канал для переходу калію у рослину. Отже, при домінуванні високоселективного каналу надходження К у рослину спостерігається сильна дискримінація  $^{137}Cs$ . На відміну від К, для всіх досліджуваних ділянок та видів рослин  $^{137}Cs$  надходить у рослини завжди по низькоселективному каналу незалежно від складу ґрунтового розчину та вологості ґрунту.

1. *Ehlfken S., Kirchner G.* Environmental processes affecting plant root uptake of radioactive trace elements and variability of transfer factor data: a review // *J. Environ. Radioact.* – 2002. – **58**. – P. 97–112.
2. *Waegeneers N., Sauras-Year T., Thiry Y. et al.* Plant uptake of radiocaesium from artificially contaminated soil monoliths covering major European soil types // *J. Environ. Radioact.* – 2009. – **100**, Is. 6. – P. 439–444.
3. *Пророк В. В., Массон К. Ф. В., Тимофеев С. Ф. та ін.* Залежність вмісту  $^{137}Cs$  у рослині від параметрів ґрунту // *Вісн. Київ. ун-ту. Сер. фіз.-мат. науки.* – 2004. – Вип. 3. – С. 407–416.
4. *Булавін Л. А., Пророк В. В., Агеев В. А. та ін.* Залежність вмісту  $^{137}Cs$  у рослині від параметрів ґрунтового розчину // *Доп. НАН України.* – 2007. – № 8. – С. 197–203.
5. *Prorok V. V., Mason C. F. V., Ageyev V. A. et al.* The Transfer of dissolved  $^{137}Cs$  from soil to plants // *Proc. of WM'06. Tucson (Arizona).* – 2006. – Sess. 66.
6. *Maathuis F. J. M., Sanders D.* Mechanisms of potassium absorption by higher plant roots // *Phys. Plant.* – 1996. – **96**. – P. 158–168.
7. *Maathuis F. J. M., Ichida A. M., Sanders D et al.* Roles of High Plant  $K^+$  Channels // *Plant Phys.* – 1997. – **114**. – P. 1141–1149.
8. *Demidchik V., Davenport R. J., Testerio M.* Nonselective Cation Channels in Plants // *Ann. Rev. Plant Biol.* – 2002. – **53**. – P. 67–107.

9. White P. J., Broadley M. R. Mechanisms of caesium uptake by plants // *New Phytol.* – 2000. – **147**. – P. 241–256.
10. Hampton C. R., Droadlug M. R., White P. J. Short review: the mechanisms of radiocaesium uptake by *Arabidopsis* roots // *Nukleonika.* – 2005. – **50**, sup. 1. – S. 3–8.
11. Qi Z., Hampton C. R., Shin R. et al. The high affinity K<sup>+</sup>-transporter AtHAK5 plays a physiological role in planta at very low K<sup>+</sup> concentrations and provides a caesium uptake pathway in *Arabidopsis* // *J. Exp. Bot.* – 2008. – **59**, No 3. – P. 595–607.
12. Zhu Y.-G., Smolders E. Plant uptake of radiocaesium: a review of mechanisms, regulation and application // *Ibid.* – 2000. – **51**, No 351. – P. 1635–1645.
13. Пророк В. В. Механізми надходження калію та цезію до рослини // *Вісн. Київ. ун-ту. Сер. фіз.-мат. науки.* – 2007. – Вип. 4. – С. 365–368.
14. Пророк В. В. Пояснення закономірностей надходження <sup>137</sup>Cs та калію до рослини у природних умовах // *Там само.* – 2009. – Вип. 1. – С. 271–274.
15. Рейвн П., Эверт Р., Айкхорн С. Современная ботаника. Т. 2. – Москва: Мир, 1990. – 344 с.

Київський національний університет  
ім. Тараса Шевченка

Надійшло до редакції 17.05.2010

Academician of the NAS of Ukraine **L. A. Bulavin, V. V. Prorok, L. V. Poperenko**

### **Factors determining the concentration of <sup>137</sup>Cs in a plant on polluted land under natural conditions**

*Experimental data on the concentration of <sup>137</sup>Cs and K in plants and in the corresponding soil solution from several experimental sites under natural conditions in the Chernobyl Exclusion Zone are analyzed. All the investigated plants at all our experimental sites uptake <sup>137</sup>Cs mainly via low-affinity cation channels at any composition of the soil solution and the soil humidity. The plant uptakes potassium mainly via low-affinity cation channels if the plant has enough potassium. At the potassium starvation, the plant uses the high-affinity potassium channel for the potassium uptake as well. The high discrimination of <sup>137</sup>Cs is observed in this case.*