

УДК 543.423:574

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.,
Розуван С.Г.⁶, к.ф.-м.н., н.с.,
Поперенко Л. В.⁷, д.ф.-м.н., проф.

V. V. Prorok¹, PhD,
P. J. White², Prof,
O. I. Dacenko³, PhD,
L. A. Bulavin⁴, Prof.,
L. Yu. Melnychenko⁵, PhD,
S.G. Rozouvan⁶, PhD,
L. V. Poperenko⁷, Prof.

Залежність від часу концентрації ¹³⁷Cs у грунтового розчині у польових умовах у 10-км зоні відчуження Чорнобильської АЕС

Time dependence of ¹³⁷Cs concentration in soil solution at field conditions in the 10-km Exclusion Zone of the Chernobyl Nuclear Power Plant

^{1,3,4,5,6,7} Київський національний університет
імені Тараса Шевченка, 01601, м. Київ,
вул. Володимирська 64/13,
e-mail: ¹prorok@univ.kiev.ua

² The James Hutton Institute, Invergowrie, Dundee
DD2 5DA, Scotland (UK)

^{1,3,4,5,6,7} Taras Shevchenko National University of
Kyiv, 01601, Kyiv, Volodymyrska st. 64/13,
e-mail: ¹prorok@univ.kiev.ua

² The James Hutton Institute, Invergowrie, Dundee
DD2 5DA, Scotland (UK)

Експериментально досліджено залежність від часу концентрації ¹³⁷Cs у грунтового розчині протягом двох років на трьох дослідних ділянках з різними властивостями ґрунтів у природних умовах у 10-км зоні відчуження Чорнобильської АЕС. Концентрація ¹³⁷Cs у зразках грунтового розчину визначалася за допомогою гама-спектрометра з напівпровідниковим детектором HPGe ORTEC GMX40P4-83-RB РОПТОР sn.48-TN22465A. Мінімальна детектована ¹³⁷Cs активність складала 0,1 Bq на зразок для часу вимірювання 10.000 s з середньостатистичною похибкою 20% (p=0,95). Згідно з отриманими даними, ця величина істотно змінювалася протягом часу досліджень. Аналіз отриманих даних показав, що концентрація ¹³⁷Cs у грунтового розчині не корелює з вологістю ґрунту та з жодною з наведених метеорологічних характеристик. Після аналізу отриманих результатів зроблено висновок, що найбільш ймовірною причиною змін концентрації ¹³⁷Cs є мікробіологічна активність в досліджуваних ґрунтах.

Ключові слова : польові умови, цезій-137, грунтовий розчин

Experiments were performed during 2012 and 2013 years at three field sites within the 10 km Exclusion Zone of the Chernobyl Nuclear Power Plant. Samples of the soils were selected several times during the every growth season. Humidity of soils were determined for each of the selected soil sample. Soil solution was extracted by a centrifuge from every soil sample. The obtained soil solution was first filtered through filter paper with a pore diameter 1-3 μm, and then through a membrane filter with a pore diameter of 0,1μm. The soil solutions were transparent after filtration. The concentration of ¹³⁷Cs in the samples was determined by a gamma-spectrometer with the semiconductor detector HPGe ORTEC GMX40P4-83-RB РОПТОР sn.48-TN22465A. The minimum detectable ¹³⁷Cs activity was 0,1 Bq/sample for a measurement time of 10.000 s with a statistical error of 20% (p=0,95). The obtained data show that the concentration of ¹³⁷Cs substantially changes during the experiment time. The analysis of the obtained data proved that the ¹³⁷Cs concentration in the soil solution correlated neither to the soil humidity nor to any meteorological characteristics including an average daily air temperature, a number of total hours of bright sunlight and average relative air humidity. It was concluded after the analysis of the obtained experimental results that the most credible reason for changes of the ¹³⁷Cs concentration in the soil solution is a microbiological activity in the studied soils.

Key words: field conditions, cesium-137, soil solution

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

Вступ

Вивчення надходження ^{137}Cs до рослини відноситься до найбільш актуальних проблем радіоекології. На відміну від стронцію, в якого є дуже гарний аналог відносно надходження до рослини (кальцій), що значно полегшує прогнозування надходження стронцію до рослини, у цезію такого аналога серед елементів макроживлення рослин нема. Однозначного зв'язку між надходженням до рослини ^{137}Cs та калію, який вважається аналогом цезію, не спостерігається. Численні дослідження надходження цезію до рослин, на жаль, проводяться не завжди коректно. Часто проводять порівняння надходження цезію до різних видів рослин, що вирости в різних умовах. Між тим, у роботах [1-3] показано, що навіть в рослинах одного й того ж виду, що вирости на тій самій ділянці, але в різний час, вміст цезію інколи відрізняється у десятки разів. Автори вказаних публікацій пояснюють це різною концентрацією ^{137}Cs та калію у ґрунтовому розчині та різною вологістю ґрунтів в різний час.

Задача прогнозування надходження цезію до рослини, що росте на даній ділянці з даним типом ґрунту, дуже складна. З нашої точки зору доцільно її розбивати на дві задачі: – задачу прогнозування складу ґрунтового розчину на даній ділянці, як функції від часу, та задачу прогнозування надходження цезію до рослини в залежності від параметрів ґрунтового розчину та властивостей рослини. Це дві окремі доволі складні задачі. Ми вважаємо, що об'єднання цих двох задач в одну є також однією з причин того, що після півстолітніх досліджень й дуже багатьох публікацій на цю тему на сьогоднішній день нема надійної методики прогнозування надходження цезію до рослин, що підтверджують останні публікації (наприклад, [4]).

Надходження цезію до рослини у якийсь конкретний момент часу визначається в першу чергу параметрами ґрунтового розчину в цей момент часу. Є чимало теоретичних досліджень (наприклад, [5-8]) щодо вмісту цезію у ґрунтовому розчині в залежності від параметрів ґрунту.

На жаль, експериментальних даних щодо вмісту цезію у ґрунтовому розчині у природних умовах у літературі дуже мало. В роботі [9] наведені результати таких досліджень для кількох забруднених ^{137}Cs експериментальних ділянок у 30-км зоні відчуження Чорнобильської АЕС. В даній роботі було проведено експериментальне дослідження залежності від

часу концентрації ^{137}Cs у ґрунтовому розчині у природних умовах у 10-км зоні на інших ділянках з іншими властивостями ґрунтів.

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. Гама-фон 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. Усі досліджувані ґрунти мають низьку солонуватість та підвищену кислотність. Хімічний аналіз ґрунтів проведено за методиками, описаними в [10].

Ми відбирали зразки ґрунтів по кілька разів кожного сезону. З ґрунту екстрагувався ґрунтовий розчин за допомогою центрифуги ОС-6М (СРСР). Частота обертання вала приводу складала до 6000 обертів на хвилину. Якщо відібраний зразок ґрунту був недостатньо вологий для центрифугування, в цей ґрунт добавлялася дистильована вода. Центрифугування проводилось через 12 годин після додавання води. 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%. Висушування зразків ґрунту проводилося в сушильній печі при температурі 100 °С. Концентрація ^{137}Cs у зразках ґрунтового розчину визначалася за допомогою гама-спектрометра з напівпровідниковим детектором HPGe ORTEC GMX40P4-83-RB ПОРТОР sn.48-TN22465A (АМТЕК, USA) з експериментальною похибкою 10%. Мінімальна детектована ^{137}Cs активність складала 0,1 Вq на зразок для часу вимірювання 10.000 s з середньостатистичною похибкою 20% ($p=0,95$). Більш детально методика експерименту описана в [11].

Таблиця 1

Середньомісячні погодні умови на дослідних ділянках [12].

2012 Місяць	Середньо місячна температура повітря (°C)		Загальне число сонячних годин	Середня вологість повітря (%)
	min.	max.		
Травень	11.0	22.6	226	69
Червень	13.0	23.5	187	74
Липень	15.7	27.4	265	73
Серпень	13.6	24.4	181	77
Вересень (до 09.18)	9.2	21.2	100	78

2013 Місяць	Середньо місячна температура повітря (°C)		Загальне число сонячних годин	Середня вологість повітря (%)
	min.	max.		
Травень	11.8	24.1	215	67
Червень	15.3	26.0	220	71
Липень	13.9	24.6	228	75
Серпень (до 08.20)	13.1	26.9	199	69

У графі «Загальне число сонячних годин» враховані тривалість дня та хмарність кожного дня вказаного місяця.

У таблиці 2 приведені вологість ґрунту та концентрація ^{137}Cs у ґрунтовому розчині на всіх ділянках під час експерименту.

Аналіз отриманих експериментальних даних показав, що концентрація ^{137}Cs у ґрунтовому розчині не корелює з вологістю ґрунту (табл. 2) та з жодною з наведених метеорологічних характеристик. Найбільш ймовірною причиною змін концентрації ^{137}Cs у ґрунтовому розчині є

Список використаних джерел

1. Пророк В.В. Залежність вмісту ^{137}Cs 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. Пророк В.В. Закономірності надходження ^{137}Cs з ґрунту до рослини / В.В. Пророк, Л.А. Булавін, В.А.Агеєв та ін // Ядерна фізика та енергетика. 2007. – Т.19, №1. – С.115-122.

мікробіологічна активність в ґрунтах протягом часу досліджень.

Таблиця 2

Вологість ґрунту та концентрація ^{137}Cs у ґрунтовому розчині для всіх експериментальних ділянок та дат відбору зразків

Дата	Д		Б		Б2	
	h	Бк/л	h	Бк/л	h	Бк/л
2012, Трав. 04		5,2		1,9		
2012, Трав. 28	0,139	8,52	0,006	12,4		
2012, Черв. 25	0,208	6,01	0,058	4,4		
2012, Срп. 01	0,202		0,008	14,41		
2012, Вер. 18	0,358	5,21	0,050	7,6		
2013, Трав. 15	0,252	2,32	0,072	5,11	0,024	6,53
2013, Черв. 04	0,345	2,64	0,111	9,15	0,074	19,1
2013, Черв. 26	0,173	4,89	0,018	14,32	0,012	16,95
2013, Лип. 09	0,0772	1,85	0,011	10,62	0,004	7,31
2013, Срп. 20	0,0718	2,52	0,007	7,43	0,006	3,92

Висновки

У природних умовах концентрація ^{137}Cs у ґрунтовому розчині весь час змінюються. Найбільш ймовірною причиною змін концентрації ^{137}Cs є мікробіологічна активність в досліджуваних ґрунтах протягом часу досліджень.

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

References

1. PROROK, V.V. et al. (2004) Dependence of ^{137}Cs at the plant on the soil parameters. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv Series Physics & Mathematics*. (3). p. 407-416.
2. PROROK, V.V. et al. (2007) Lows of ^{137}Cs transition from the soil to the plant. *Nuclear Physics and Energetic*. 19 (1), p.115-122.

3. Prorok V.V. The transfer of dissolved ^{137}Cs 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: <http://www.wmsym.org/archives/2006/pdfs/6423.pdf>.
4. Waegeneers N. Plant uptake of radiocaesium from artificially contaminated soil monoliths covering major European soil types / N. Waegeneers, T. Sauras-Year, Y. Thiry et al. // J. Environ. Radioact. – 2009. – V.100, No 6. – P. 439-444.
5. Протас Н.М. Механизмы, контролирующие миграцию радионуклидов в системе почва-растение / Н.М. Протас, Л.И. Шпинар, И.И. Ясковец // Агроекологічний журнал. – 2004. – №2. – С.67-72.
6. Пристер Б.С. Способ комплексной оценки свойств почвы для прогнозирования накопления радионуклидов растениями / Б.С. Пристер, Г. Бизольд, Ж. Девиль-Ковелин // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2003. – Т.43, №.6. – С.688-696.
7. Ehlken S. Environmental processes affecting plant root uptake of radioactive trace elements and variability of transfer factor data: a review / S. Ehlken, G. Kirchner // J. Environ. Radioact. – 2002. – Vol.58. – P.97-112.
8. Коноплев А.В. Параметризация перехода ^{137}Cs из почвы в растения на основе ключевых почвенных характеристик / А.В. Коноплев, И.В. Коноплева // Радиационная биология. Радиоэкология. – 1999. – Т.39, №.4. – С.455-461.
9. Пророк В.В. Залежність від часу концентрації калію, ^{137}Cs та відношення $^{137}\text{Cs}/\text{K}$ у ґрунтового розчині / В.В. Пророк // Вісник Київського ун-ту. Сер. фіз.-мат. науки. – 2009. – Вип.4. – С. 225-228.
10. Александрова Л.Н. Лабораторно-практические занятия по почвоведению: [4-е изд.] / Л.Н. Александрова, О.А. Найденова. – Л.: Агропромиздат, 1986. – 295 с.
11. Prorok V.V. Mechanistic interpretation of the varying selectivity of Cesium-137 and potassium uptake by radish (*Raphanus sativus L.*) under field conditions near Chernobyl / V.V. Prorok, O.I. Dacenko, L.A. Bulavin et al. // J. Environ. Radioact. – 2016. – Vol.152. – P.85-91.
12. Архив погоды в Чернобыле. Website. Online Available from: http://rp5.ua/Архив_погоды_в_Чернобыле.
3. PROROK, V.V. et al. (2006) The transfer of dissolved ^{137}Cs from soil to plants. In *Proc. of WM'06. Session 66.*, 26th February to 2nd March 2006 [Online]. Tucson. Available from: <http://www.wmsym.org/archives/2006/pdfs/6423.pdf>.
4. WAEGENEERS, N. et al. (2009) Plant uptake of radiocaesium from artificially contaminated soil monoliths covering major European soil types. *J. Environ. Radioact.* 100 (6). p. 439-444.
5. PROTAS, N.M., SHPINAR, L.I., YASKOVETS, I.I. (2004) Mechanisms controlling radionuclide migration in soil-plant system. *Agroecol. J.* (2). p.67-72.
6. PRISTER, B.S., BIZOLD, G., DEVIL-KOVELIN, J. (2003) Method of complex estimation of soil properties to predict the radionuclide accumulation. *Radiat. Biol. Radioecol.* 43 (6). p.688-696.
7. EHLKEN, S., KIRCHNER, G. (2002) Environmental processes affecting plant root uptake of radioactive trace elements and variability of transfer factor data: a review. *J. Environ. Radioact.* 58. p.97-112.
8. KONOPLEV, A.V., KONOPLEVA, I.V. (1999) Parameterization of ^{137}Cs transition from soil to plant based on key soil characteristics. *Radiat. Biol. Radioecol.* 39 (4). p.455-461.
9. PROROK, V.V. (2009) Dependencies of concentration of potassium, ^{137}Cs and ratio $^{137}\text{Cs}/\text{K}$ in soil solution on time. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv Series Physics & Mathematics.* (4). p.225-228.
10. ALEKSANDROVA, L.N. and NAIDENOVA, O.A. (1986) *Laboratory and practical classes of soil science.* 4th Ed. Leningrad. Agropromisdat.
11. PROROK, V.V. et al. (2016) Mechanistic interpretation of the varying selectivity of Cesium-137 and potassium uptake by radish (*Raphanus sativus L.*) under field conditions near Chernobyl. *J. Environ. Radioact.* 152. p.85-91.
12. *Archive of weather in Chernobyl.* [Online] Available from: <http://rp5.ua/Chornobyl>.

Надійшла до редколегії 26.02.16 р.