ДОПОВІДІ
НАЦІОНАЛЬНОЇ
АКАДЕМІЇ НАУК
УКРАЇНИ

8 • 2007

ЕКОЛОГІЯ

УДК 631.95:543.423

© 2007

Академік НАН України **Л. А. Булавін, В. В. Пророк, В. А. Агєєв, Л. Ю. Мельниченко, В. В. Осташко**

Залежність вмісту ^{137}Cs у рослині від параметрів грунтового розчину

Different kinds of rapidly maturing plants were grown simultaneously at experimental sites under natural conditions at the Chornobyl Exclusion Zone. The content of ^{137}Cs *in a plant and in the corresponding soil solution and the content of the soil solution in soil were measured. We have first established that, for all investigated plants and experimental sites, the* ^{137}Cs *plant uptake is approximately proportional to the concentration of dissolved* ^{137}Cs *in the soil — to the product of the* ^{137}Cs *content in the soil solution and the content of the soil solution per unit volume of soil.*

Проблема надходження ^{137}Cs до рослин вивчається протягом близько півстостоліття, але особливої актуальності вона набула після чорнобильської аварії. За цей період часу виконано багато досліджень стосовно даної тематики (див., наприклад, [1–11]), ряд авторів вважають різні параметри визначальними для надходження ^{137}Cs до рослин. Багато дослідників розглядають калій (K) як аналог ^{137}Cs відносно їх надходження до рослини (див., наприклад, оглядові роботи S. Ehlken, G. Kirchner [1] та M. Frissel та ін. [2]). Але в роботах В. В. Пророка та інших авторів [12, 13] експериментально досліджували величину $(^{137}\mathrm{Cs/K})_p/(^{137}\mathrm{Cs/K})_{ss}$, де $(^{137}\mathrm{Cs/K})_p$ — відношення вмісту ^{137}Cs до вмісту K у рослині; $(^{137}\mathrm{Cs/K})_{ss}$ — відношення вмісту ^{137}Cs до вмісту K у відповідному грунтовому розчині. Результати цього експерименту свідчать, що для досліджуваних ділянок та рослин вказана величина змінюється в діапазоні, який перевищує два математичні порядки.

К. Й. Йохансон, М. І. Долгилевич, Г. І. Васенков [3] вважають, що одним з найголовніших параметрів, який визначає надходження ^{137}Cs до рослин, є вміст органічної речовини в грунті (особливо гумінових кислот). Однак у роботі A. Nisbet, та R. Woodman [4] на підставі аналізу наведених результатів не було встановлено зв'язок між коефіцієнтом переходу грунт — рослина та вмістом органічної речовини в грунті.

Г. І. Агапкіна з колегами [5] стверджує, що більша частина радіонуклідів у грунтовому розчині асоційована з різними молекулярними фракціями органічної речовини і асоціація радіонуклідів з молекулами грунтового розчину є дуже важливим фактором для надходження радіонуклідів до рослин. Концентраційний коефіцієнт рослина — грунтовий

розчин для різних молекулярних фракцій грунтового розчину відрізняється іноді на два математичні порядки. Найбільш "біодоступною" фракцією грунтового розчину є фракція з молекулярною масою 1000 ат. од. Але ці погляди теж не є загальноприйнятими.

Тридцять різних типів грунтів були забруднені ^{137}Cs та інкубувалися протягом 41 доби, потім на цих грунтах вирощувався райграс протягом 19 діб [6] (E. Smolders та ін.). Це був горщиковий експеримент. Відносна вологість усіх грунтів при рості рослин була незмінною. У статті [6] запропоновано двопараметричну модель для $\log R$ (R — концентраційне відношення грунтовий розчин : рослина для ^{137}Cs), де єдиною змінною величиною є концентрація K у грунтовому розчині. Але, згідно з експериментальними даними, що містяться в цій роботі, при однаковій концентрації калію в грунтовому розчині для різних грунтів R інколи відрізняються на два математичні порядки. Зрозуміло, що ця різниця може бути ще більшою при зміні температури та вологості цих грунтів. Отже, ця модель теж не дуже вдала.

Б. С. Прістер та ін. [8] розробили наближену феноменологічну модель надходження радіонуклідів до рослин. Згідно з цією моделлю, це надходження детермінується трьома факторами: pH грунтового розчину, ємністю поглинання катіонів E та вмістом органічної речовини ОР. Для комплексної оцінки надходження ^{137}Cs до рослин ці автори використовують площу ефективного перетину, яку можна знайти як площу трикутника, вершини якого знаходяться у координатах нормованих значень векторів тривимірного простору pH, E та ОР.

За результатами досліджень Б. С. Прістера, Г. П. Перепелятнікова та Л. В. Перепелятнікової [9], надходження ^{137}Cs до рослин зростає із зростанням вологості грунту. Однак, за даними роботи S. Ehlken, G. Kirchner [10], надходження ^{137}Cs до рослин зменшується при зростанні вологості грунту.

Зазначені моделі тільки дозволяють говорити у деяких випадках про кореляцію параметрів грунту або грунтового розчину з надходженням ^{137}Cs до рослин. Дослідження продовжуються, тому що до цього часу нема надійної моделі, що однозначно визначає надходження ^{137}Cs у рослини.

Дана робота присвячена пошуку параметрів, які в першу чергу визначають вміст ^{137}Cs у рослині. В. В. Пророк та ін. [14, 15] довели експериментально, що в природних умовах концентрація ^{137}Cs у грунтовому розчині постійно змінюється. Жодна з існуючих методик розрахунку параметрів грунтового розчину на основі параметрів грунту не дозволяє описати ці зміни. У цій роботі ми не досліджуємо зв'язок між хімічними, фізичними та іншими параметрами грунту та складом грунтового розчину, а шукаємо зв'язок між параметрами грунтового розчину та надходженням ^{137}Cs у рослини. Параметри грунтового розчину вимірюються експериментально. Ми досліджуємо залежність надходження ^{137}Cs до рослин від вмісту розчиненого ^{137}Cs в одиниці об'єму грунту. Вказана величина дорівнює добутку концентрації ^{137}Cs у грунтовому розчині та вмісту грунтового розчину у одиниці об'єму грунту.

Методика експерименту. Дослідження проводили у 2002 та 2003 роках у польових умовах на трьох дослідних ділянках, що розташовані на відстані 30 км від Чорнобильської АЕС у північно-східному напрямі:

ділянка **A** — дерново-підзолистий середньоопідзолений глейуватий піщаний грунт, що розвивається на водно-льодовикових пісках; середнє забруднення ^{137}Cs становить приблизно 980 Бк/м^2;

ділянка **B** — торф'яно-болотний низинного типу грунт, який розвивається на торфах середньої товщини з осоки, очерету та деревини, що добре розклалися; середнє забруднення ^{137}Cs становить приблизно 13 000 Бк/м^2;

ділянка **C** — дерново-підзолистий середньоопідзолений з ознаками тимчасового надмірного зволоження супіщаний грунт, що розвивається на водно-льодовикових супісках; середнє забруднення ^{137}Cs становить приблизно 620 Бк/м^2;

Усі експериментальні ділянки перекопували навесні 2002 та 2003 років. Ми висівали на ділянках **A**, **B**, **C** перемішане насіння скороспілих культур, які максимально відрізняються за властивостями одна від одної. Це редька (*raphanus sativus*), салат (*lactuca sativa*), крес-салат (*lepidium sativum*). Ці рослини висівали на всіх експериментальних ділянках по кілька разів протягом кожного сезону. Параметри грунтового розчину для всіх рослин були однакові, тому що вони зростали поряд на тій самій ділянці у той самий час. Ми відбирали зразки кілька разів кожного сезону. Кожного разу ми відбирали зразки грунтів, зразки висіяних рослин (якщо вони виросли) та зразки диких рослин. Це були пирій повзучий (*elytrigia repens*), тимофіївка (*phleum pratense*), гірчак (*polygonum hydropiper*), кропива (*urticaceae dioica*), суріпиця (*barbaraea vulgaris*), березкá польова (*convolvulus arvensis*), чистець болотний (*stachys palustris*). Як правило, відбиралася ціла рослина, але інколи це була її частина (листя або корені). Нами відібрано всі рослини на кожній дослідній ділянці при кожному доборі рослин. Але не відбиралися паростки рослин, вони продовжували рости далі. Маса відібраних рослин кожного виду була від 5 до 500 г. Рослини відбирали до стадії їх цвітіння. Потім всі ці рослини висушували.

З грунту екстрагувався грунтовий розчин за допомогою центрифуги РС-6. Доцентрове прискорення при цьому дорівнювало 3000 г. Центрифугований розчин фільтрувався спочатку через скляний фільтр Whatman GF/A, а потім через фільтр ТУ 6–09–1678–86. Діаметр пор становив близько 3 мкм. Грунтовий розчин після фільтрування був прозорим. Для його консервації додавали концентровану азотну кислоту в пропорції 1 мл кислоти на 500 мл грунтового розчину, нагрівали розчин до кипіння.

Ми визначали вологість грунту h як відношення маси води в зразку до маси сухого грунту в цьому зразку з експериментальною похибкою 10%. Вміст ^{137}Cs (активність) на одиницю маси сухої рослини та у грунтових розчинах визначали за допомогою гамма-спектрометра "ORTEC" з експериментальною похибкою 5–15 %. Більш детально методику експерименту описано в [12].

Результати дослідження та їх обговорення. На рис. 1 наведений вміст ^{137}Cs у висушених рослинах для різних дат відбору зразків, що виросли на ділянці **B**. Для ділянок **A** та **C** ця залежність має схожий вигляд [12]. На рис. 2 наведений середній вміст ^{137}Cs у висушених рослинах для різних дат відбору зразків для всіх дослідних ділянок. Як показали експериментальні результати, вміст ^{137}Cs в усіх відібраних на тій самій ділянці у той самий день різних видів рослин незначно (не більше ніж удвічі) відрізняється від деякої середньої величини для даної ділянки та для даної дати відбору. Ці відмінності існують внаслідок неоднорідності розподілу ^{137}Cs у грунті, плюс через зміни параметрів грунтового розчину протягом росту рослин, плюс внаслідок різниці у надходженні ^{137}Cs до різних видів рослин, а також через інші фактори. Тому можна зробити висновок, що, як правило, для всіх наших експериментальних ділянок вміст ^{137}Cs у рослині змінюється внаслідок неоднорідності розподілу ^{137}Cs у грунті не більше ніж удвічі від деякого середнього значення. З наведених даних випливає, що вміст ^{137}Cs в одному й тому ж виді рослин з тієї ж самої дослідної ділянки змінюється залежно від дати її відбору. Для більшості випадків для кожної експериментальної ділянки різниця у вмісті ^{137}Cs між двома відібраними у різний час однаковими видами рослин більша, ніж різниця у вмісті ^{137}Cs між двома відібраними в один день різними видами рослин. Таким чином, вміст ^{137}Cs у відібраних у різний час

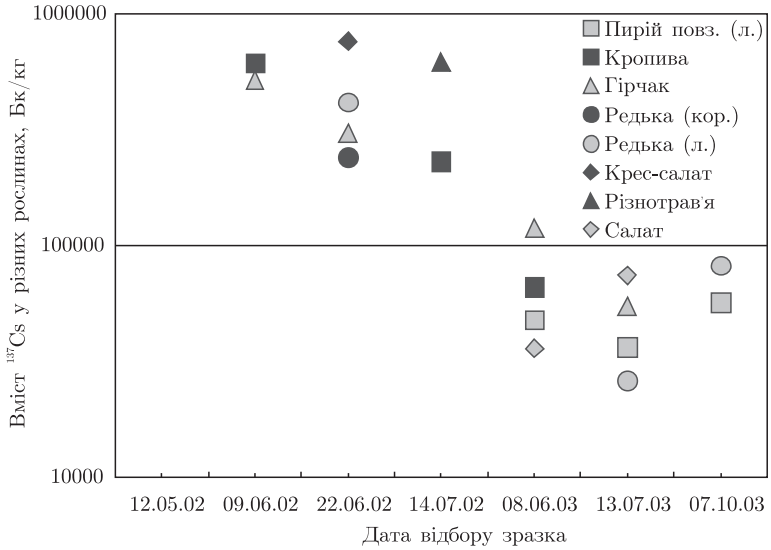

Рис. 1. Залежність вмісту ^{137}Cs у різних рослинах, що відібрані на ділянці **B**, від дати відбору зразка

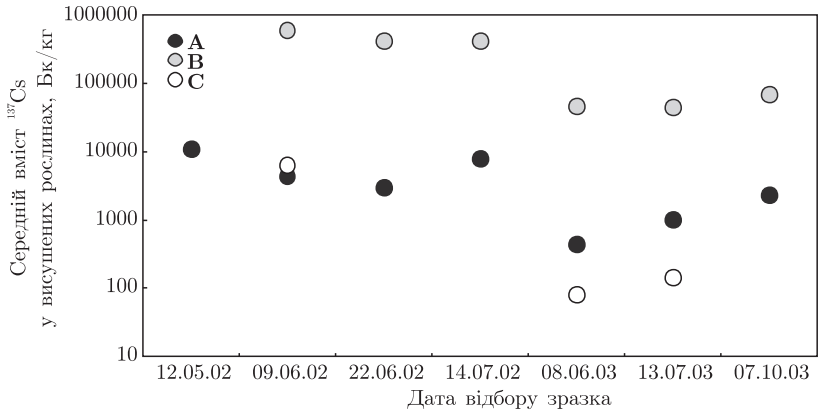

Рис. 2. Залежність від дати відбору зразка середнього вмісту ^{137}Cs у висушених рослинах, що відібрані на ділянках **A**, **B**, **C**

рослинах одного виду на тій самій ділянці відрізняється іноді більше ніж у 10 разів. Велике відхилення вмісту ^{137}Cs у тому самому виді рослин (у 10 разів) внаслідок неоднорідності розподілу ^{137}Cs у грунті та інших вказаних вище факторів має низьку ймовірність. Зазначене відхилення для кількох рослин одночасно має мізерну ймовірність, тому що ймовірність кількох випадкових подій дорівнює добутку ймовірностей усіх цих подій, згідно з теорією ймовірності. Таке відхилення вмісту ^{137}Cs у рослинах даного виду для даної ділянки для різних дат відбору не може визначатися неоднорідністю розподілу ^{137}Cs у грунті. Ми повинні шукати інші причини цих відхилень. Некоректно говорити про надходження ^{137}Cs до даного виду рослин на даній ділянці взагалі. Можна визначити тільки про це надходження у даний момент часу.

Аналогічно вмісту ^{137}Cs у рослинах, концентраційне відношення R рослина : грунтовий розчин (коефіцієнт переходу) також істотно залежить від дати відбору та від типу грунту, але практично не змінюється залежно від виду відібраної рослини на даній дослідній ділянці [12, 15]. На рис. 3 наведені середні величини коефіцієнта переходугрунтовий розчин —

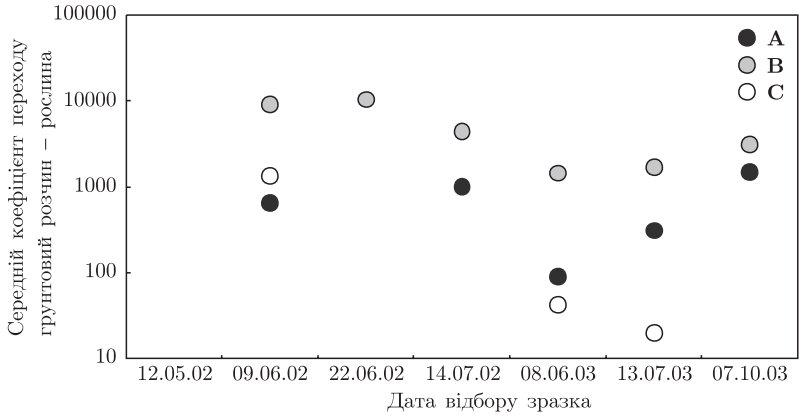

Рис. 3. Залежність від дати відбору зразка середнього коефіцієнта переходу грунтовий розчин — рослина для рослин, що відібрані на ділянках **A**, **B**, **C**

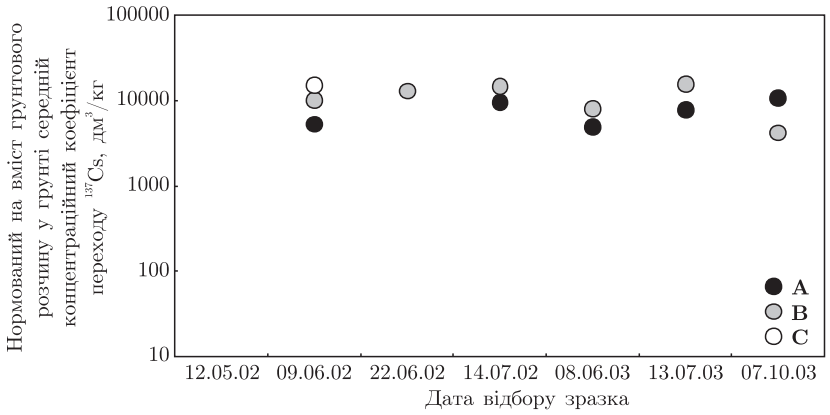

Рис. 4. Залежність від дати відбору зразка середнього нормованого на вміст грунтового розчину у грунті коефіцієнта переходу c грунтовий розчин — рослина для рослин, що відібрані на ділянках **A**, **B**, **C**

рослина для кожної ділянки та дати відбору зразків. Для досліджуваних експериментальних ділянок та дат відбору зразків відношення концентрацій ^{137}Cs рослина : грунтовий розчин R змінюється у межах трьох математичних порядків. На рис. 4 наведений середній коефіцієнт переходу (c) грунтовий розчин — рослина для кожної ділянки та дати відбору, нормований на вміст грунтового розчину в одиниці об'єму грунту, тобто величина $c = R/h\gamma$, де h — вологість грунту на момент відбору зразків; γ — питома вага сухого грунту. Нормований коефіцієнт переходу змінюється у діапазоні одного математичного порядку, тобто у 100 разів менше, ніж ненормований. З рис. 4 можна бачити, що у деякому наближенні c є постійною величиною для всіх досліджуваних рослин та ділянок. Позначимо середнє значення величини c для всіх наших дослідних ділянок та рослин через c_0. Ця величина дорівнює приблизно 9000 дм^3/кг.

Зробимо деякі алгебраїчні перетворення:

$$\frac{R}{h\gamma} = c_0, \qquad R = c_0 h\gamma, \qquad R = \frac{A}{A_1}, \tag{1}$$

де A — вміст ^{137}Cs у рослині; A_1 — вміст ^{137}Cs у грунтовому розчині.

Таким чином, згідно з (1), вміст ^{137}Cs у рослині можна визначити за формулою

$$A = c_0 h \gamma A_1. \tag{2}$$

Формула (2) показує, що вміст ^{137}Cs у рослині приблизно пропорційний вмісту ^{137}Cs у грунтовому розчині в одиниці об'єму грунту, або, іншими словами, він приблизно пропорційний концентрації розчиненого ^{137}Cs у грунті. Звідси випливає, що вміст розчиненого в даний момент у грунті ^{137}Cs є найголовнішим параметром, що впливає на надходження ^{137}Cs у рослини. Для досліджуваних нами ділянок та рослин усі інші фактори, що впливають на надходження ^{137}Cs у рослини, змінюють це надходження лише у межах одного математичного порядку, причому сюди входить варіювання вмісту ^{137}Cs у рослині внаслідок неоднорідності його розподілу в грунті, яке у природних умовах може бути доволі значним.

Таким чином, для всіх дослідних ділянок та рослин вміст ^{137}Cs у рослині залежить приблизно пропорційно від концентрації розчиненого ^{137}Cs у грунті (від добутку концентрації ^{137}Cs у грунтовому розчині та вмісту вологи в одиниці об'єму).

Аналогічні дослідження треба провести також для інших типів грунтів та рослин. На жаль, у більшості публікацій про надходження ^{137}Cs до рослин не наведено інформації про вміст ^{137}Cs у грунтовому розчині та про вологість грунту, тому ми не можемо порівняти дані цих публікацій з одержаними нами результатами. Некоректно порівнювати надходження ^{137}Cs до рослин, що виросли навіть на тій самій ділянці, але в різний час, якщо невідомі параметри грунтового розчину підчас їх зростання.

У природних умовах вологість грунту та концентрація ^{137}Cs у грунтовому розчині постійно змінюються [14, 15]. Внаслідок цього в природних умовах надходження ^{137}Cs у рослини на кожній ділянці залежить від часу. Ми досліджували швидкорослі рослини. Вологість грунту та концентрація ^{137}Cs у грунтовому розчині змінювалися не дуже істотно протягом росту рослин. Ці зміни були однакові для всіх рослин, що зростають на даній ділянці, тому різниця у вмісті ^{137}Cs у рослинах, що відібрані на тій самій ділянці у той самий день, невелика. Для більш точного визначення вмісту ^{137}Cs у рослині треба врахувати швидкість приросту біомаси кожної рослини та залежність від часу вологості грунту та вмісту ^{137}Cs у грунтовому розчині протягом росту рослин.

Використовуючи отримані результати, можна вміст ^{137}Cs у даній рослині, що виросла за проміжок часу t_1–t_2, описати такою формулою:

$$A = \frac{\gamma c_0 \int\limits_{t_1}^{t_2} A_1(t) v(t) h(t) dt}{\int\limits_{t_1}^{t_2} v(t) dt}, \tag{3}$$

де $A_1(t)$ — залежність вмісту ^{137}Cs у грунтовому розчині від часу; $v(t)$ — залежність швидкості приросту маси рослини від часу; $h(t)$ — залежність вологості грунту від часу.

У формулі (3) у чисельнику — надходження ^{137}Cs до рослини за проміжок часу t_1–t_2, а у знаменнику — приріст маси цієї рослини за даний час.

Дослідження виконано за фінансової підтримки УНТЦ (проект 2390).

1. *Ehlken 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. *Frissel M. J.* Generic values for soil-to-plant transfer factors of radiocesium // Ibid. – 2002. – **58**. – P. 113–128.
3. *Иохансон К. И., Долгилевич М. И., Васенков Г. И.* Функции органического вещества, определяющие поведение радиоцезия в системе почва : растение // Вісн. аграр. науки. – 1997. – № 3. – С. 52–54.
4. *Nisbet A. F., Woodman R. F. M.* Soil-to-plant transfer factors for radiocesium and radiostrontium in agricultural systems // Health Phys. – 2000. – **78**. – P. 279–288.
5. *Агапкина Г. И.* Содержание и формы соединений техногенных радионуклидов в почвенных растворах // Сб. докл. II Обнин. симп. по радиоэкологии. (Обнинск, 27–31 мая 1996 г.) – Обнинск, 1996. – С. 73–74.
6. *Smolders E., Van den Brande K., Merckx R.* Concentration of ^{137}Cs and K in Soil Solution Predict the plant availability of Cs-137 in Soils // Environ. Sci. Technol. – 1997. – **31**. – P. 3432–3438.
7. *Протас Н. М., Шпинар Л. И., Ясковец И. И.* Механизмы, контролирующие миграцию радионуклидов в системе почва — растение // Агроэколог. журн. – 2004. – № 2. – С. 67–72.
8. *Пристер Б. С., Бизольд Г., Девиль-Ковелин Ж.* Способ комплексной оценки свойств почвы для прогнозирования накопления радионуклидов растениями // Радиац. биология. Радиоэкология. – 2003. – **43**, № 6. – С. 688–696.
9. *Prister B. S., Perepelyatnikov G. P., Perepelyatnikova L. V.* Countermeasures used in the Ukraine to produce forage and animal food products with radionuclide levels below intervention limits after Chornobyl Accident // Sci. Total Environment. – 1993. – **137**. – P. 183–198.
10. *Ehlken S., Kirchner G.* Seasonal variations in soil-to-grass transfer of fallout strontium and cesium and potassium in North German soils // J. Environ. Radioact. – 1996. – **33**. – P. 147–181.
11. *Коноплев А. В., Коноплева И. В.* Параметризация перехода ^{137}Cs из почвы в растения на основе ключевых почвенных характеристик // Радиац. биология. Радиоэкология. – 1999. – **39**, № 4. – С. 455–461.
12. *Prorok V. V., Mason C. F. V., Ageyev V. A., Ostashko V. V., Melnichenko L. Yu.* The Transfer of dissolved ^{137}Cs from soil to plants // Proc. WM'06, sess. 66 – Innovative Field Monitoring for Environmental Remediation. Tucson (Arizona), 26 febr. – 2 march, 2006. – Tucson, 2006. – WM06/66.html.
13. *Пророк В. В., Мельниченко Л. Ю., Шайкевич І. А.* Дослідження зв'язку між вмістом ^{137}Cs та K у рослині та у грунтовому розчині // Вісн. Київ. ун-ту. Сер фіз.-мат. науки. – 2005. – Вип. 7. – С. 51–54.
14. *Пророк В. В., Мельниченко Л. Ю., Осташко В. В., Агеев В. А.* Найважливіші параметри грунтового розчину, що визначають вміст ^{137}Cs у рослині // Агроэколог. журн. – 2005. – № 4. – С. 71–75.
15. *Пророк В. В., Масон К. Ф. В., Тімофєєв С. Ф. та ін.* Залежність вмісту ^{137}Cs у рослині від параметрів грунту // Вісн. Київ. ун-ту. Сер фіз.-мат. науки. – 2004. – Вип. 3. – С. 407–416.

Київський національний університет
ім. Тараса Шевченка

Надійшло до редакції 29.12.2006