

УДК 631.438: 581.5

А. А. Баклай¹, Л. Н. Москальчук², Т. Г. Леонтьева¹

¹Государственное научное учреждение «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны»
Национальной академии наук Беларуси

²Белорусский государственный технологический университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗВЕСТКОВАНИЯ НА МИГРАЦИЮ РАДИОСТРОНЦИЯ В СИСТЕМЕ МИНЕРАЛЬНАЯ ПОЧВА – РАСТЕНИЕ

Разработана математическая модель миграции ^{90}Sr в системе минеральная почва – растение. Получено выражение для расчета коэффициента накопления ^{90}Sr в сельскохозяйственных растениях, являющееся комбинацией ключевых показателей почвы (доля обменной формы ^{90}Sr , коэффициент селективности обмена пары $^{90}\text{Sr} - \text{Ca}$, содержание обменного кальция) и растения (содержание кальция). Модель адаптирована и использована для прогноза влияния известкования на миграцию радиостронция из дерново-подзолистой супесчаной почвы в растение (проростки ячменя). Выполнена оценка влияния известкования на миграцию радиостронция из дерново-подзолистой супесчаной почвы в проростки ячменя и проведено сравнение с теоретическими результатами. Показано, что теоретические результаты по снижению миграции радиостронция из дерново-подзолистой супесчаной почвы в проростки ячменя в результате ее известкования хорошо согласуются с полученными экспериментальными данными. В условиях лабораторного эксперимента по изучению влияния известкования на миграцию радиостронция из почвы в растение установлено, что внесение CaCO_3 в дерново-подзолистую супесчаную почву ($\text{pH}_{\text{KCl}} = 4,2$) в количестве 1,8 г/кг снизило его миграцию из данной почвы в проростки ячменя в два раза.

Ключевые слова: радиостронций, обменная форма, миграция, моделирование, дерново-подзолистая супесчаная почва, коэффициент накопления, коэффициент селективности, известкование.

A. A. Baklay¹, L. N. Moskal'chuk², T. G. Leont'yeva¹

¹State Scientific Institution "Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny"
of the National Academy of Sciences of Belarus

²Belarusian State Technological University

MODELING OF THE EFFECT OF LIMING ON THE MIGRATION OF RADIOSTRONTIUM IN THE MINERAL SOIL – PLANT SYSTEM

A mathematical model of ^{90}Sr migration in the mineral soil – plant system is developed. An equation for calculating the accumulation coefficients of ^{90}Sr in agricultural plants, which is a set of key soil (rate of the exchange form of ^{90}Sr , the selectivity coefficient of pair of $^{90}\text{Sr} - \text{Ca}$, the content of the exchangeable calcium) and plant (calcium content) characteristics, was obtained. The model is adapted and used for predicting the effect of liming on radiostrontium migration from soddy-podzolic sandy loamy soil to plant (barley sprouts). The effect of liming on the radiostrontium migration from soddy-podzolic sandy loamy soil to barley seedlings was assessed and compared with theoretical data. The theoretical data on the reduction of the radiostrontium migration from limed soddy-podzolic sandy loamy soil to barley sprouts are shown to correspond well with the experimental data. A laboratory experiment studying the effect of liming on the radiostrontium migration from soil to plant established that insertion of 1.8 g/kg of CaCO_3 to soddy-podzolic sandy loamy soil ($\text{pH}_{\text{KCl}} = 4.2$) halved its migration from soil to barley seedlings.

Key words: radiostrontium, exchangeable form, migration, modeling, soddy-podzolic sandy loamy soil, accumulation coefficient, selectivity coefficient, liming.

Введение. Поступление радионуклидов в аграрные экосистемы является следствием деятельности человека: ядерных испытаний и ра-

диационных аварий, а также нормализованных выбросов предприятий ядерной энергетики. В связи с высокой токсичностью и способностью

легко включаться в процессы геохимической и биологической миграции ^{90}Sr относится к числу наиболее опасных радионуклидов [1]. За период, прошедший после аварии на Чернобыльской АЭС, в результате трансформации форм выпавших радиоактивных продуктов подвижность и биологическая доступность ^{90}Sr в экосистемах, где не проводилась их реабилитация, увеличилась в 5–10 раз [2]. Анализ литературных данных свидетельствует о преобладании ионообменного механизма сорбции ^{90}Sr компонентами почв и относительно высоким его содержанием в почвенных растворах по сравнению с радионуклидами ^{137}Cs , ^{239}Pu и ^{241}Am [1, 2]. В результате ^{90}Sr наиболее интенсивно перераспределяется в экосистемах и мигрирует по пищевым цепям, попадая в организм человека и формируя дозу внутреннего облучения наряду с ^{137}Cs .

Для описания миграции (перехода) ^{90}Sr в системе минеральная почва – растение используют коэффициент накопления (КН), равный отношению равновесных концентраций ^{90}Sr в растении (р) и почве (п), Бк/кг:

$$\text{КН} = \frac{[^{90}\text{Sr}]_p}{[^{90}\text{Sr}]_п}. \quad (1)$$

КН ^{90}Sr зависит от ряда показателей, характеризующих свойства почвы, растения и макроэлемента – аналога кальция (Ca). В работе [3] показано, что кратность различий КН ^{90}Sr для одного и того же вида растений, произрастающего на различных почвах, превышает 40 раз. В связи с этим использование усредненных значений КН ^{90}Sr приводит к значительным ошибкам в оценке доз и повышению риска для населения, проживающего на загрязненных радионуклидами территориях.

Одним из возможных путей решения проблемы может стать разработка модели, учитывающей влияние физико-химических процессов на миграцию ^{90}Sr в системе минеральная почва – почвенный раствор – растение, использование которой позволит проводить корректную оценку КН ^{90}Sr на основе показателей почвы и растения, а также оценку эффективности различных способов реабилитации почв, загрязненных ^{90}Sr . Несмотря на то, что существует ряд моделей [4–6], описывающих миграцию ^{90}Sr в системе почва – растение, приемлемое выражение, необходимое для расчета КН ^{90}Sr растениями, отсутствует. В связи с этим разработка математических моделей для количественного описания такого сложного физико-химического процесса, как миграция ^{90}Sr в системе почва – почвенный раствор – растение, является актуальной задачей, так как позволяет

охарактеризовать данный процесс через ограниченное число показателей и характеристик почвы и растения.

Целью настоящей работы является разработка математической модели, описывающей миграцию ^{90}Sr из почвы в растение при известковании кислой минеральной почвы и ее проверка с использованием экспериментальных данных.

Математическая модель. Преобразуем формулу (1), используя следующие выражения:

$$K_d = \frac{[^{90}\text{Sr}]_п}{[^{90}\text{Sr}]_{\text{пр}}}; \quad (2)$$

$$\text{КН}_{\text{пр-р}} = \frac{[^{90}\text{Sr}]_p}{[^{90}\text{Sr}]_{\text{пр}}}, \quad (3)$$

где K_d – коэффициент распределения ^{90}Sr между почвой и почвенным раствором, л/кг; $\text{КН}_{\text{пр-р}}$ – коэффициент накопления ^{90}Sr растением из почвенного раствора, л/кг; $[^{90}\text{Sr}]_{\text{пр}}$ – концентрация ^{90}Sr в почвенном растворе, Бк/л.

После соответствующих преобразований с использованием выражений (1)–(3) получаем

$$\text{КН} = \frac{1}{K_d} \cdot \text{КН}_{\text{пр-р}}. \quad (4)$$

В соответствии с выражением (4) миграция ^{90}Sr из почвы в растение определяется особенностями его поведения в системах почва – почвенный раствор и почвенный раствор – растение, которые характеризуются следующими показателями: K_d и $\text{КН}_{\text{пр-р}}$. Величины, входящие в значение K_d (почва – почвенный раствор) и $\text{КН}_{\text{пр-р}}$ (почвенный раствор – растение), имеют одну и ту же природу, так как в каждой из них содержатся только концентрации ^{90}Sr в той или иной фазе системы почва – почвенный раствор – растение. Между этими показателями существует связь, на которую влияет концентрация основных катионов почвенного раствора, конкурирующих за сорбционные места с ^{90}Sr в почве и корневом обменном комплексе (КОК). Согласно данным работы [7], основным катионом почвенного раствора для ^{90}Sr , конкурирующим за места сорбции в почве и КОК, является кальций (Ca). Почва, почвенный раствор и растение выступают в системе как единое целое, а соответственно, и движение материальных потоков ^{90}Sr и его химического аналога Ca в них должно быть взаимосвязано. Таким образом, поскольку миграционная способность химических элементов ^{90}Sr и Ca зависит от прочности их связи с почвой и переход ^{90}Sr и Ca из почвы в почвенный раствор, а затем в растение можно рассматривать как последовательность

их обменно-сорбционных реакций, появляется возможность прогнозирования их концентраций в растениях. Для того чтобы прогнозировать концентрацию ^{90}Sr в растении по концентрации Са в нем, предположим следующее:

1. Са и ^{90}Sr в почвенном растворе находятся в динамическом равновесии с двумя ионообменниками – почвой и КОК, а содержание в почве доступного калия достаточно для нормального роста и развития растения.

2. Фиксированная форма ^{90}Sr в почве не участвует в реакциях обмена с Са почвенного раствора.

3. Поведение ^{90}Sr в растении подчиняется тем же закономерностям, что и поведение его химического аналога Са.

4. Распределение ^{90}Sr по компонентам растения осуществляется пропорционально содержанию Са в валовом приросте компонентов.

Обменный коэффициент распределения ($K_d^{\text{обм}}$) ^{90}Sr в системе почва – почвенный раствор зависит от сорбционных свойств почвы и концентрации Са в почвенном растворе и определяется выражением [1]:

$$K_d^{\text{обм}} = K_c(^{90}\text{Sr}/\text{Ca}) \cdot \frac{[\text{Ca}]_{\text{п}}^{\text{обм}}}{[\text{Ca}]_{\text{пр}}}, \quad (5)$$

где $K_c(^{90}\text{Sr}/\text{Ca})$ – коэффициент селективности обмена пары ^{90}Sr – Са; $[\text{Ca}]_{\text{п}}^{\text{обм}}$ – концентрации обменного Са в почве, моль/кг; $[\text{Ca}]_{\text{пр}}$ – концентрации Са в почвенном растворе, моль/л.

$K_d^{\text{обм}}$ ^{90}Sr связан с $K_d^{\text{обм}}$ ^{90}Sr выражением [1]:

$$K_d^{\text{обм}} = \alpha_{\text{обм}} \cdot K_d, \quad (6)$$

где $\alpha_{\text{обм}}$ – доля обменной формы ^{90}Sr в почве, характеризующая фиксирующую способность почвы.

Для количественной характеристики поступления ^{90}Sr из почвенного раствора в растение в присутствии Са используют выражение

$$\text{КН}_{\text{пр-р}}(^{90}\text{Sr}) = \text{НО} \cdot \text{КН}_{\text{пр-р}}(\text{Са}), \quad (7)$$

где НО – наблюдаемое отношение; $\text{КН}_{\text{пр-р}}(\text{Са})$ – коэффициент накопления Са в растении из питательного раствора, л/кг.

Известно [8–9], что заметная дискриминация стабильного Sr при его поступлении в растение из питательного раствора происходит только при концентрации Sr более 0,1 ммоль/л. При меньших концентрациях, обычных для почвенных растворов, Sr поступает в растение практически также, как и Са (НО = 1), причем НО для этой пары элементов не зависит от концентрации Са в растворе, по крайней мере до 5 ммоль/л. На основании данных работ [8–9], выражение (7) можно записать следующим образом:

$$\frac{[^{90}\text{Sr}]_{\text{р}}}{[^{90}\text{Sr}]_{\text{пр}}} = \frac{[\text{Ca}]_{\text{р}}}{[\text{Ca}]_{\text{пр}}}, \quad (8)$$

где $[\text{Ca}]_{\text{р}}$ – концентрация Са в растении, моль/кг.

Используя выражения (3)–(6) и (8), получаем

$$\begin{aligned} \text{КН} &= \frac{\alpha_{\text{обм}}}{K_c(^{90}\text{Sr}/\text{Ca})} \cdot \frac{[\text{Ca}]_{\text{р}}}{[\text{Ca}]_{\text{п}}^{\text{обм}}} = \\ &= \frac{\alpha_{\text{обм}}}{K_c(^{90}\text{Sr}/\text{Ca})} \cdot \text{КН}(\text{Са}), \end{aligned} \quad (9)$$

где $\text{КН}(\text{Са})$ – коэффициент накопления обменного Са растением из почвы.

Выражение (9) позволяет оценить эффективность различных агрохимических мероприятий (известкование, внесение сорбентов), направленных на снижение миграции ^{90}Sr из почвы в растение.

Основная часть. Объектом математического моделирования в данной работе является система, состоящая из почвы, почвенного раствора и растения, в которую вносится известковый материал. Известкование рассматривается в качестве основного способа реабилитации сельскохозяйственных почв, загрязненных ^{90}Sr [1]. Для изучения влияния известкования на миграцию ^{90}Sr из почвы в растение и проверки модели использовали набор данных, полученных в лабораторных опытах с дерново-подзолистой супесчаной почвой, характерной для наиболее загрязненных ^{90}Sr районов Гомельской области Беларуси и 14-дневными проростками ячменя. Почва перед внесением в нее известкового материала в виде известняка (CaCO_3) характеризовалась следующими физико-химическими показателями: содержание физической глины – 9,3 мас. %, содержание гумуса – 1,6 мас. %, pH_{KCl} – 4,2 и содержание обменного Са – 23 мэкв/кг. Подготовку почвы, внесение в нее ^{85}Sr (в качестве радиоактивной метки вместо ^{90}Sr), а затем различных количеств CaCO_3 , посев зерен ячменя и их полив проводили по методике [10]. Значения pH_{KCl} почвы изменяли в пределах 4,2–6,0 путем внесения в нее CaCO_3 в количестве 0,2–1,8 г/кг. Активность ^{85}Sr в почве и растительном материале, содержание обменного Са в почве и Са в проростках ячменя определяли методами сцинтилляционной гамма-спектрометрии и атомно-абсорбционной спектрофотометрии на приборах РУС-91М и Varion Spectr AA250 соответственно.

Из выражения (9) следует, что поступление ^{90}Sr из почвы в растение обратно пропорционально зависит от содержания Са в почве

и прямо пропорционально от его содержания в растении, а также от отношения $\alpha_{обм} / K_c(^{90}\text{Sr} / \text{Ca})$.

Корреляционный анализ данных растительных (проростки ячменя) и сопряженных почвенных образцов выявил достоверную обратную корреляцию между КН ^{85}Sr в проростках ячменя и содержанием обменного кальция в дерново-подзолистой супесчаной почве (рис. 1).

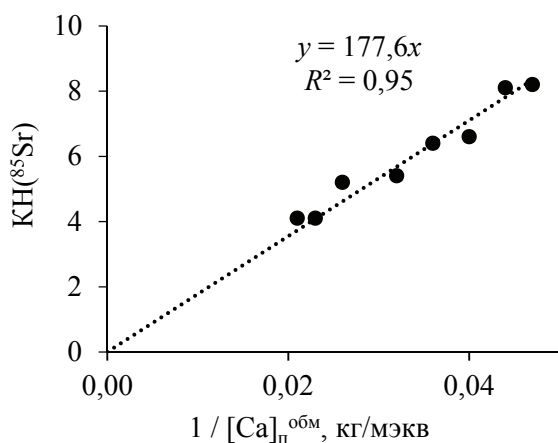


Рис. 1. Зависимость КН ^{85}Sr в проростках ячменя от обратного содержания в дерново-подзолистой почве обменного кальция

Из рис. 1 видно, что с увеличением $1 / [\text{Ca}]_{п}^{обм}$ наблюдается рост КН ^{85}Sr в проростках ячменя. Коэффициент корреляции (R^2) для прямой, проходящей через начало координат, составляет 0,95. Выражение линейной регрессии для проростков ячменя имеет следующий вид:

$$y = 177,6x. \quad (10)$$

Коэффициент линейной регрессии из выражения (10) определяет угол наклона прямой (рис. 1), который зависит от биологических особенностей растения. Полученные результаты (рис. 1) показывают, что внесение CaCO_3 в количестве 1,8 г/кг в дерново-подзолистую супесчаную почву снижает миграцию ^{85}Sr из данной почвы в проростки ячменя в два раза.

В работе [4] на основании обобщения экспериментальных результатов сделан вывод, что накопление ^{90}Sr в сельскохозяйственных растениях обратно пропорционально зависит от содержания обменного Са в почве и прямо пропорционально от потребности растения в нем. Для практического применения выражения (9) с целью прогноза КН ^{90}Sr в растении (части растения) по агрохимическим показателям дерново-подзолистой супесчаной почвы и растения (содержанию обменного Са в почве и Са в растении) без проведения специальных лабораторных экспериментов необходимо знать среднее значение отношения $\alpha_{обм} / K_c(^{90}\text{Sr} / \text{Ca})$

в пределах pH_{KCl} почвы 4,2–6,0. Ранее выполненными исследованиями определено, что среднее значение $\alpha_{обм} / K_c(^{90}\text{Sr} / \text{Ca})$ для дерново-подзолистых почв Беларуси в пределах $\text{pH}_{\text{KCl}} = 4,2\text{--}6,0$ составляет $0,67 \pm 0,15$ [11].

Выражение (9) для прогноза миграции ^{90}Sr из почвы в растение при известковании дерново-подзолистой супесчаной почвы с учетом среднего отношения $\alpha_{обм} / K_c(^{90}\text{Sr} / \text{Ca})$ может быть записано следующим образом:

$$\text{КН} = 0,67 \cdot \frac{[\text{Ca}]_p}{[\text{Ca}]_{п}^{обм}} = 0,67\text{КН}(\text{Ca}). \quad (11)$$

На рис. 2 приведены результаты сравнения экспериментальных и рассчитанных по выражению (11) значений КН ^{85}Sr для проростков ячменя. Хорошее согласие теоретических расчетов и экспериментальных данных (рис. 2) свидетельствует о том, что сделанные при выводе выражения (9) предположения достаточно обоснованы.

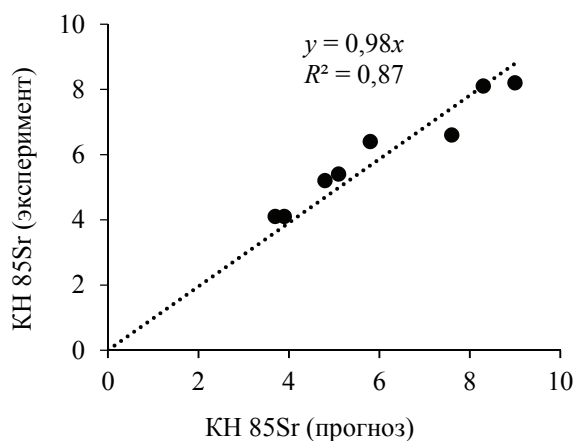


Рис. 2. Сравнение экспериментальных и рассчитанных согласно выражению (11) значений КН ^{85}Sr для проростков ячменя

Заключение. В работе исходя из теоретических положений, закономерностей и анализа экспериментальных данных предложена геохимическая модель миграции ^{90}Sr в системе минеральная почва – растение. Получено выражение для оценки миграции ^{90}Sr в системе минеральная почва – растение, являющееся комбинацией ключевых показателей почвы (доля обменной формы ^{90}Sr , коэффициент селективности обмена пары $^{90}\text{Sr} - \text{Ca}$, содержание обменного кальция) и растения (содержание кальция). Достоинством модели является малое число показателей, которые могут быть определены с помощью стандартных физико-химических методов.

Модель адаптирована и применена для прогноза влияния известкования на миграцию

радиостронция из дерново-подзолистой супесчаной почвы в проростки ячменя.

На основании выполненной оценки влияния известкования на миграцию ^{85}Sr из почвы в проростки ячменя установлено, что внесение CaCO_3 в количестве 1,8 г/кг в дерново-подзолистую супесчаную почву ($\text{pH}_{\text{KCl}} = 4,2$)

снижает миграцию ^{85}Sr из данной почвы в проростки ячменя в два раза.

Показано, что теоретические результаты по снижению миграции радиостронция из дерново-подзолистой супесчаной почвы в проростки ячменя в результате ее известкования хорошо согласуются с полученными экспериментальными данными.

Литература

1. Роль химии в реабилитации сельскохозяйственных угодий, подвергшихся радиоактивному загрязнению / Н. И. Санжарова [и др.] // Рос. хим. журн. 2005. Т. XLIX. № 3. С. 26–34.
2. Миграция ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239,240}\text{Pu}$ и ^{241}Am в системе «почва – почвенный раствор – растение». Звено «почва – почвенный раствор» / Г. А. Соколик [и др.] // Доклады НАН Беларуси. 1999. Т. 43. № 2. С. 103–109.
3. Бондарь П. Ф. Влияние почвенно-климатических условий на накопление ^{89}Sr растениями и прогнозирование уровней загрязнения урожая // Агрохимия. 1983. № 7. С. 69–79.
4. Дричко В. Ф., Цветкова В. В. Сорбционная модель поступления радионуклидов из почвы в растения // Почвоведение. 1990. № 10. С. 35–40.
5. Sysoeva A. A., Sanzharova N. I., Konopleva I. V. Bioavailability of radiostrontium in soil: Experimental study and modeling // Journal of Environmental Radioactivity. 2005. Vol. 81. P. 269–282.
6. Maskal'chuk L. N., Baklay A. A., Leontieva T. G. Modeling of Radiostrontium in «Mineral Soil – Plants» System in the Performance of Liming // Journal of Chemical Engineering and Chemistry Research. 2015. Vol. 2. No. 3. P. 521–528.
7. Sentenac H., Grignon C. A model for predicting ionic equilibrium concentrations in the cell walls // Plant Physiology. 1981. Vol. 68. P. 415–419.
8. Поляков Ю. А. Радиоэкология и дезактивация почв. М.: Атомиздат, 1970. 304 с.
9. Ion competition effect on selective absorption of radionuclides by komatsuna (*Brassica rapa* var. *perviridis*) / S. Ambe [et al.] // Environ. Experim. Botany. 1999. Vol. 41. P. 185–194.
10. Влияние калия и кислотности на состояние ^{137}Cs в почвах и его накопление проростками ячменя в вегетационном опыте / В. С. Анисимов [и др.] // Почвоведение. 2002. № 11. С. 1323–1332.
11. Москальчук Л. Н., Баклай А. А., Леонтьева Т. Г. Прогнозирование перехода ^{90}Sr из почвы в растение на основе физико-химических характеристик почв // Экологический вестник. 2014. № 3(29). С. 38–43.

References

1. Sanzharova N. I., Sysoeva A. A., Isamov N. N., Aleksakhin R. M., Kuznetsov V. K., Zhigareva T. L. The role of chemistry in the rehabilitation of agricultural lands exposed to radioactive contamination. *Ros. khim. zhurn.* [Russian Chemistry Journal], 2005, vol. XLIX, no. 3, pp. 26–34 (In Russian).
2. Sokolik G. A., Ovsyannikova S. V., Kilchytskaya S. L. Migration of ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239,240}\text{Pu}$ and ^{241}Am in the system “soil – soil solution – plant”. The “soil – soil solution” link. *Doklady NAN Belarusi* [Proceedings of NAS of Belarus], 1999, vol. 43, no. 2, pp. 103–109 (In Russian).
3. Bondar' P. F. Influence of soil-climatic conditions on the accumulation of ^{89}Sr by plants and forecasting levels of crop contamination. *Agrokhimiya* [Agrochemistry], 1983, no. 7, pp. 69–79 (In Russian).
4. Drichko V. F., Tsvetkova V. V. Sorption model of radionuclides intake from soil to plants. *Pochvovedeniye* [Agrology], 1990, no. 10, pp. 35–40 (In Russian).
5. Sysoeva A. A., Sanzharova N. I., Konopleva I. V. Bioavailability of radiostrontium in soil: Experimental study and modeling. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2005, vol. 81, pp. 269–282.
6. Maskalchuk L. N., Baklay A. A., Leontieva T. G. Modeling of Radiostrontium in «Mineral Soil – Plants» System in the Performance of Liming. *Journal of Chemical Engineering and Chemistry Research*. 2015, vol. 2, no. 35, pp. 521–528.
7. Sentenac H., Grignon C. A model for predicting ionic equilibrium concentrations in the cell walls. *Plant Physiology*. 1981, vol. 68, pp. 415–419.
8. Polyakov Y. A. *Radioekologiya i dezaktivatsiya pochv* [Radioecology and decontamination of soils]. Moscow, Atomizdat Publ., 1970. 304 p.
9. Ambe S., Shinonaga T., Ozaki T., Enomoto S., Yasuda H., Uchida S. Ion competition effect on selective absorption of radionuclides by komatsuna (*Brassica rapa* var. *perviridis*). *Environ. Experim. Botany*. 1999, vol. 41, pp. 185–194.

10. Anisimov V. S., Kruglov S. V., Aleksakhin R. M., Suslina L. G., Kuznetsov V. K. Effect of potassium and acidity on the form of ^{137}Cs in soils and its accumulation by barley sprouts in the vegetation experience. *Pochvovedeniye* [Agrology], 2002, no. 11, pp. 1323–1332 (In Russian).

11. Moskal'chuk L. N., Baklay A. A., Leont'eva T. G. Forecasting the transition of ^{90}Sr from soil to plant based on physical and chemical characteristics of soils. *Ekologicheskiy vestnik* [Ecological bulletin], 2014, no. 3(29), pp. 38–43 (In Russian).

Информация об авторах

Баклай Анатолий Анатольевич – старший научный сотрудник лаборатории «Реабилитация загрязненных территорий». ГНУ «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» Национальной академии наук Беларуси (220109, г. Минск, а/я 119, Республика Беларусь). E-mail: a.baklay@tut.by

Москальчук Леонид Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры лесоводства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: leonmosk@tut.by

Леонтьева Татьяна Геннадьевна – старший научный сотрудник лаборатории «Реабилитация загрязненных территорий». ГНУ «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» Национальной академии наук Беларуси (220109, г. Минск, а/я 119, Республика Беларусь). E-mail: t.leontieva@tut.by

Information about the authors

Baklay Anatoliy Anatol'yevich – Senior Researcher Remediation Polluted Territories of the Laboratory. SSI “Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny” of the National Academy of Sciences of Belarus (P. O. Box 119, 220109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: a.baklay@tut.by

Moskal'chuk Leonid Nikolaevich – DSc (Engineering), Professor, the Department of Silviculture. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: leonmosk@tut.by

Leont'yeva Tat'yana Gennad'yevna – Senior Researcher Remediation Techno Polluted Territories of the Laboratory. SSI “Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny” of the National Academy of Sciences of Belarus (P. O. Box 119, 220109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: t.leontieva@tut.by

Поступила 15.06.2017