

**Фитопоглощение радия-226 из техногенно загрязнённых почв
на примере *Chamaenerion angustifolium*,
Lathirus pratensis и *L. vernus***

© 2018. Л. М. Шапошникова, к. б. н., н. с.,
ФГБУН Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28,
e-mail: shaposhnikova.l.m@ib.komisc.ru

Исследовано влияние физико-химического состава радиоактивно загрязнённых почв на поглощение радия-226 иван-чаем узколистым (*Chamaenerion angustifolium*) и чиньей (*Lathirus pratensis*, *L. vernus*). Методами корреляционного и регрессионного анализа выявлено, что валовое содержание радия в исследуемых техногенных почвах больше всего зависит от содержания в них органического углерода и фосфора, содержание подвижных форм (ПФ) радионуклида связано с такими физико-химическими характеристиками как содержание органического углерода, а также обменных катионов кальция и магния. Межвидовых различий в накоплении радия указанными растениями выявлено не было. При этом содержание радия в растениях в большей степени было связано с валовым содержанием радионуклида в почвах, в то время как с содержанием ПФ радионуклида корреляция была менее значима. Основные факторы, влияющие на распределение радионуклида в почве, опосредованно влияли и на его содержание в растениях. К числу наиболее значимых можно отнести содержание органического вещества, фосфора, калия, соотношение физического песка (ФП) и физической глины (ФГ).

Ключевые слова: радий-226, биологическое поглощение, формы радия, факторы подвижности радия.

**Phytoabsorption of radium-226 from technogenically
contaminated soils by the example of *Chamaenerion angustifolium*,
Lathirus pratensis and *L. vernus***

© 2018. L. M. Shaposhnikova ORCID: 0000-0002-4181-4903,
Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
e-mail: shaposhnikova.l.m@ib.komisc.ru

The absorption of radium-226 by *Chamaenerion angustifolium*, *Lathirus pratensis* and *L. vernus* from podzolic soil contaminated with solid radioactive dumps (site 1) and alluvial sod soil contaminated with radioactive water (site 2) has been studied. The concentration of radium was 0.18–63.4 Bq/g of ashed weight (AW) in soil of site 1 and 0.05–21.4 Bq/g of AW in soil of site 2. The univariate analysis of variance did not reveal interspecific differences in the accumulation of the radionuclide by plants. However, the content of radium in plants selected from the area with dumps was higher than in the area contaminated with radioactive waters. Thus, the concentration of radium was 1.08–11.67 and 0.64–8.86 Bq/g of AW for *C. angustifolium* and *L. vernus* growing in the site 1 and 0.04–3.35 and 0.04–3.78 Bq/g of AW for *C. angustifolium* and *L. pratensis* sampled at site 2. The content of mobile (watersoluble and exchangeable) forms of radium in the soils of both sites was significantly indistinguishable. The obtained results showed that the concentration of radium in the studied plant species depends most on its total content in the soil and, to a lesser extent, on the content of its mobile forms. Multiple regression analysis showed that the total content of radium in contaminated soils depends to the greatest extent on the content of organic matter and phosphorus in them. The content of radium mobile forms is associated with the content of organic matter, as well as exchangeable cations of calcium and magnesium. The correlation between radium content in the plants and these alkali-earth elements was not confirmed. Among the most significant factors which affected radium adsorption by plants was the content of organic matter, phosphorus, potassium, the ratio of physical sand and physical clay.

Key words: radium-226, biological absorption, radium forms, mobility factors.

Фитопоглощение радионуклидов является сложным многофакторным процессом, связанным с биологическими особенностями растений, а также обусловленным влиянием внешних условий окружающей среды [1–3]. Видоспецифичность растений в поглощении радия широко обсуждается в литературе, в частности, в сфере возможного их использования в качестве фитоэкстрагентов [4, 5]. Почвы являются важнейшим биогеохимическим барьером для перехода радионуклидов в растительность. Однако в условиях техногенного радиоактивного загрязнения они характеризуются значительной неоднородностью физико-химических параметров, что влияет на специфику форм нахождения и биологическую доступность радионуклидов. Многообразие факторов, способных существенно изменить аккумуляцию радионуклидов поллютантов растениями в ту или иную сторону, делают интенсивность биологического поглощения сложнопрогнозируемым параметром и затрудняют его использование при построении различных радиоэкологических моделей.

Цель данной работы – изучение влияния различных физико-химических параметров радиоактивно загрязнённых почв на поглощение радия-226 иван-чаем узколистным (*Chamaenerion angustifolium* (L.) Holub) и чиной (*Lathyrus pratensis* L., *L. vernus* (L.) Bernh.).

Материалы и методы исследований

Исследования проводили в Ухтинском районе Республики Коми на участках, загрязнённых более 60 лет назад твёрдыми (участок 1) и жидкими (участок 2) отходами производства радия из пластовых вод. Участок 1, представленный смешанным лесом, был загрязнён древесным углем, который по технологии производства радия сначала использовался в качестве сорбента, а затем выбрасывался в виде отходов, содержащих остаточное количество радионуклида. Почвенный покров участка представлен подзолистой почвой и характеризуется наличием подстилки мощностью 0–4 см, под которой находится слой этих отходов толщиной 7–23 см. Участок 2 является территорией бывшего химического завода и характеризуется пойменной аллювиально-дерновой почвой, на которой произрастает луговая растительность. Загрязнение участка произошло в результате сброса на поверхность почвы пластовых вод после добычи из них радия. Из-за несовершенства

технологии концентрация радионуклида в них оставалась повышенной, в результате содержание радия в почве увеличилось.

На участках проводили сопряжённый отбор образцов почв (слой 0–20 см) и надземных частей растений на определение содержания в них ^{226}Ra . Для работы были выбраны растения, произрастающие на обоих участках, – иван-чай узколистный (*C. angustifolium*) семейства кипрейные (Onagraceae) и растения семейства бобовые (Fabaceae) – чина весенняя (*L. vernus*) и чина луговая (*L. pratensis*), произрастающие на участках 1 и 2 соответственно (101 образец). Растения сушили на воздухе, измельчали и озоляли в муфельной печи при 500 °С. Почвы также высушивали, растирали, просеивали и прокаливали при 600 °С. ^{226}Ra в образцах определяли эманационным методом [6] с чувствительностью 0,07 Бк/г и ошибкой измерений 15%. Результаты рассчитаны на озолённую пробу.

Формы нахождения ^{226}Ra в почвах анализировали методом последовательных вытяжек. Для определения водорастворимой формы использовали дистиллированную воду, обменной – 1М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$, кислоторастворимой – 1М HCl . Соотношение твёрдой и жидкой фаз составило 1:10, время взаимодействия – 24 часа. Подвижными формами считали наиболее доступную для растений сумму водорастворимой и обменной фракций.

Физико-химический анализ почвы выполнен в лаборатории «Экоаналит» Института биологии Коми НЦ УрО РАН. Для статистической обработки данных использованы программы Microsoft Excel 2007 и Statistica 6.1.

Результаты и их обсуждение

Тип загрязнения повлиял на специфику физико-химического состава исследуемых почв, что выражалось различиями в их характеристиках (табл. 1). Так, содержание фосфора, калия, обменного кальция и органического углерода в подзолистой почве, загрязнённой отвалами, было сравнительно выше. Удельная активность радия в образцах почв этого участка также значительно превосходила соответствующие значения для участка, загрязнённого отработанными пластовыми водами, при этом растения на каждом участке произрастали в близких интервалах содержания радионуклида в почве (рис. 1). В гранулометрическом составе обоих типов почв преобладали частицы размером > 10 мкм (ФП), значения рН были близки к нейтральным. С глубиной кислотность повы-

шалась, при этом подзолистая почва обладала более кислой реакцией [7].

Удельная активность радия в образцах растений и его коэффициенты биологического поглощения (КБП), равные отношению концентраций радионуклида в золе растений и почвы, также имели широкий диапазон варьирования. Результаты однофакторного дисперсионного анализа не выявили межвидовых различий в накоплении радионуклида. Однако были выявлены значительные различия между содержанием радионуклида в растениях, ото-

бранных на разных участках (рис. 2А). Так, данный показатель варьировал для иван-чая и чины, произрастающих на участке 1, в пределах 1,08–11,67 и 0,64–8,86 Бк/г и 0,04–3,35 и 0,04–3,78 Бк/г для этих же растений, отобранных на участке 2. КБП радия изменялись от 0,03 до 12,8 для *L. pratensis* и от 0,07 до 1,98 для *L. vernus*. Для образцов *C. angustifolium*, отобранных на участке 1 и 2, значения составили 0,09–14,8 и 0,03–6,76 соответственно. Достоверных различий КБП радия для разных видов растений при этом не показали (рис. 2В).

Таблица 1 / Table 1
Физико-химические характеристики техногенно загрязнённых почв
Physicochemical characteristics of technogenically contaminated soils

Физико-химический показатель Physicochemical characteristic	Подзолистая почва (участок 1) Podzolic soil (Site 1)	Аллювиально-дерновая почва (участок 2) Alluvial sod soil (Site 2)
^{226}Ra , Бк/г / ^{226}Ra , Bq/g of AW	0,18–63,4	0,05–21,4
рН, ед. рН / рН, unit of рН	5,84–7,56	5,95–7,70
ГК, моль/кг / НА, mol/kg	0,02–0,30	0,005–0,07
Ca^{2+} , моль/кг / Ca^{2+} , mol/kg	0,07–1,09	0,05–0,47
Mg^{2+} , моль/кг / Mg^{2+} , mol/kg	0,005–0,07	0,004–0,08
P_2O_5 , мг/кг / P_2O_5 , mg/kg	26,5–2100	3,3–233
К, мг/кг / К, mg/kg	40,4–2070	83,2–440
$C_{\text{орг}}$, % / $C_{\text{орг}}$, %	0,89–40,1	0,24–11,7
ФГ, % / Particle size <10 μm , %	9,16–15,7	12,9–44,8
ФП, % / Particle size >10 μm , %	84,3–90,8	55,3–87,2

Обозначения: ^{226}Ra – содержание радия; ГК – гидролитическая кислотность; Ca^{2+} , Mg^{2+} – содержание ионов кальция и магния; P_2O_5 , К, $C_{\text{орг}}$ – содержание фосфора, калия и органического вещества; ФГ – физическая глина, ФП – физический песок.

Notes: ^{226}Ra – content of radium; НА – hydrolytic acidity; Ca^{2+} , Mg^{2+} – content of calcium and magnesium ions; P_2O_5 , К, $C_{\text{орг}}$ – content of phosphorus, potassium and organic carbon.

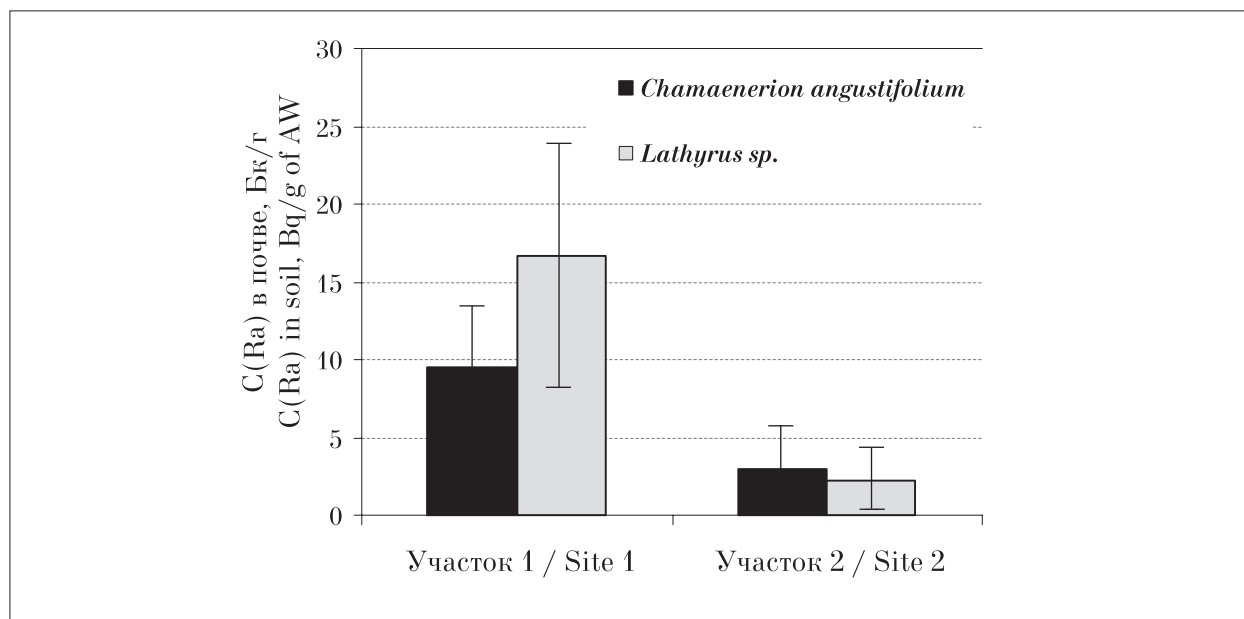


Рис. 1. Содержание радия-226 в почвах для разных видов растений
Fig. 1. The content of radium-226 in soils for different plant species

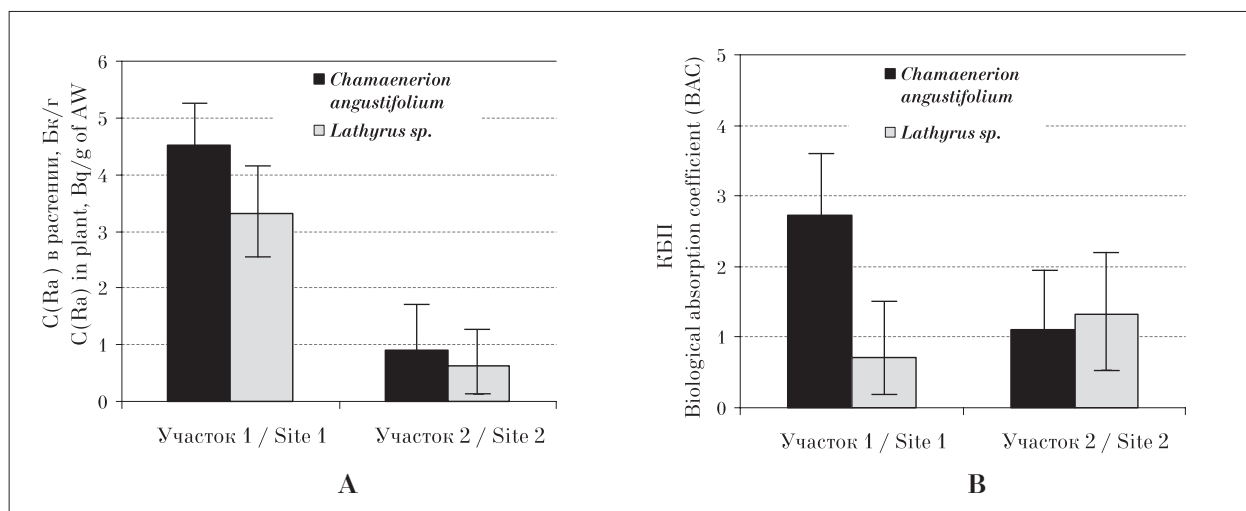


Рис. 2. Содержание радия-226 в растениях (А) и его КБП (В)
 Fig. 2. The content of radium-226 in plants (A) and its biological absorption coefficients (BAC) (B)

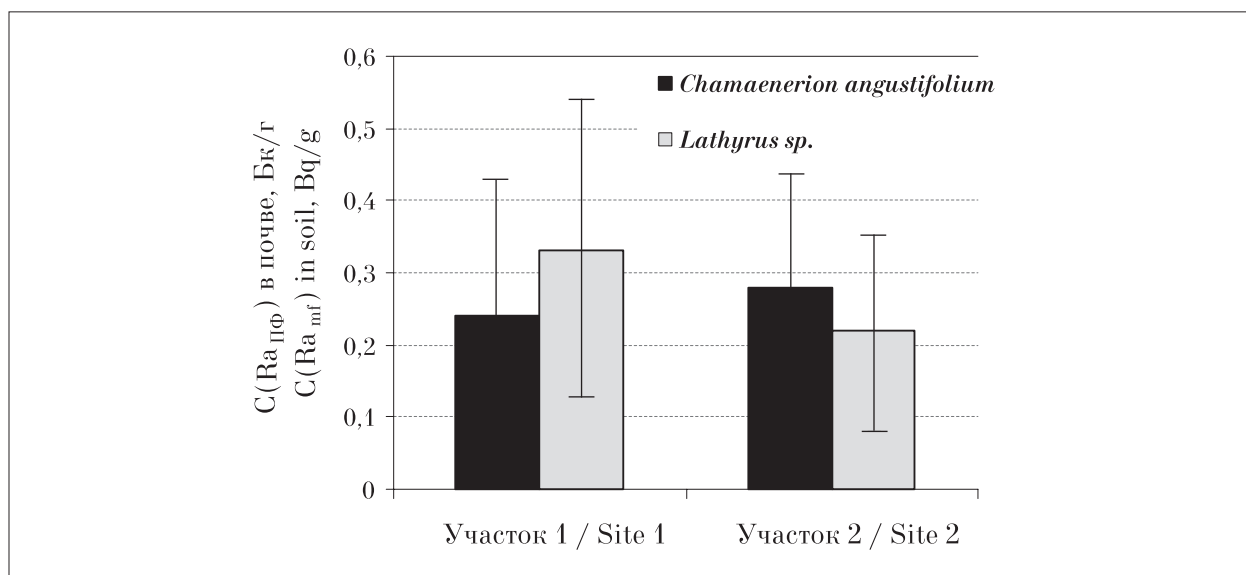


Рис. 3. Содержание подвижных форм радия-226 в почвах
 Fig. 3. The content of mobile forms (mf) of radium-226 in soils

Считается, что поглощение разных элементов почвы происходит избирательно и связано с той ролью, которую они играют в метаболизме растений. В большом количестве поглощаются элементы, необходимые им для роста. Радионуклиды, в сравнении с необходимыми элементами питания, содержатся в почве в предельно низких концентрациях. Механизм их поглощения растениями до конца остаётся неясным. Некоторые радионуклиды в следовых количествах могут быть ассимилированы вместе с их соответствующими необходимыми для растений аналогами [1, 8]. Также считается, что количество радионуклидов, которое может быть поглощено растением, в большей степени связано с соотношением различных химических форм,

в которых они присутствуют в почве, определяющим их биодоступность.

Полученные результаты показали, что относительное количество наиболее доступных для растений водорастворимых и обменных форм радия выше в аллювиально-дерновой почве, загрязнённой радиоактивными водами. В среднем их доля здесь составила 21%, в то время как в почве участка, загрязнённого отходами, их содержание было около 9%. Доля кислоторастворимых форм радия, потенциально способных включаться в биологический цикл, в обоих типах почв в среднем составила 35%. Несмотря на то, что относительное количество доступных для растений форм радия в загрязнённой аллювиально-дерновой почве было выше, фактическое их содержание из-за более низких

валовых концентраций радионуклида практически не отличалось от содержания ПФ радия в загрязнённой подзолистой почве (рис. 3). Это указывало на то, что его биологическая доступность определялась не просто содержанием исследуемых ПФ, но и возможно различиями в физико-химическом составе техногенных почв.

К важным факторам, влияющим на подвижность радионуклидов, относят такие характеристики почвы как содержание органического вещества, присутствие комплексообразователей, кислотность почвенного раствора и др. Как следствие, их биологическое поглощение из разных типов почв может сильно отличаться. Растения, произрастающие на глинистых и органических почвах, демонстрируют более низкие значения коэффициентов накопления радия, что связано с поглощающими свойствами почвенного органо-минерального комплекса, песчаные и суглинистые – более высокие [1, 9, 10]. Кислотность почвенного раствора также значительно влияет на сорбцию радионуклида [11]. Обнаружена отрицательная корреляция между коэффициентами накопления радия и рН, между содержанием ^{226}Ra в растительности и катионо-обменной ёмкостью почвы [9, 10, 12, 13]. Также считается, что радий, находясь в почвах в предельно низких концентрациях, не способен образовывать самостоятельную твёрдую фазу в процессе химических реакций, а следует за стабильными

носителями – другими элементами щелочно-земельной группы [8, 14–16].

Для определения факторов, влияющих на подвижность и биологическое поглощение радия, были исследованы зависимости содержания радионуклида в почвах и растениях от физико-химических параметров среды произрастания методами корреляционной и регрессионной статистики. Согласно результатам исследований, содержание валового и подвижного радия в загрязнённых почвах в основном коррелирует с одними и теми же параметрами, но в зависимости от типа почвы наблюдались различия в показателях, ответственных за распределение радионуклида, что вероятней всего было связано со значительными различиями в физико-химическом составе почв (табл. 2).

Так, в подзолистой почве удельная активность радия была достоверно связана с содержанием фосфора, а также её актуальной и потенциальной кислотностью, слабая корреляционная связь обнаруживалась с содержанием кальция, калия и органического вещества. В аллювиально-дерновой почве предикторами повышенных концентраций радионуклида являлось содержание органического вещества и обменных катионов кальция и магния. Полученные результаты частично согласуются с результатами работ [17, 18], в которых профильная дифференциация радия в радиоактивно загрязнённой подзолистой суглинистой почве также контролировалась процессами

Таблица 2 / Table 2

Корреляционная матрица Пирсона для зависимостей между содержанием ^{226}Ra в почве и её физико-химическими характеристиками / The Pearson correlation matrix for the dependencies between the content of ^{226}Ra in the soil and its physicochemical characteristics

Физико-химический показатель Physicochemical characteristic	Подзолистая почва (участок 1) Podzolic soil (Site 1)		Аллювиально-дерновая почва (участок 2) Alluvial sod soil (Site 2)	
	$^{226}\text{Ra}_{(\text{вал})}$ $^{226}\text{Ra}_{(\text{tot})}$	$^{226}\text{Ra}_{(\text{ПФ})}$ $^{226}\text{Ra}_{(\text{mf})}$	$^{226}\text{Ra}_{(\text{вал})}$ $^{226}\text{Ra}_{(\text{tot})}$	$^{226}\text{Ra}_{(\text{ПФ})}$ $^{226}\text{Ra}_{(\text{mf})}$
$^{226}\text{Ra}_{(\text{вал})} / ^{226}\text{Ra}_{(\text{tot})}$	1,00	0,94*	1,00	0,89*
$^{226}\text{Ra}_{(\text{ПФ})} / ^{226}\text{Ra}_{(\text{mf})}$	0,94*	1,00	0,89*	1,00
рН, ед. рН / рН, unit of рН	0,55*	0,48*	-0,01	-0,07
ГК / НА	0,43*	0,52*	0,37	0,44*
Ca^{2+}	0,32	0,42*	0,73*	0,73*
Mg^{2+}	-0,04	0,12	0,74*	0,70*
P_2O_5	0,77*	0,74*	-0,33	-0,27
К	0,28	0,26	0,34	0,37
$\text{C}_{\text{орг}} / \text{C}_{\text{org}}$	0,27	0,34	0,79*	0,80*
ФГ / Particle size < 10 μm	0,11	0,20	-0,08	0,05
ФП / Particle size > 10 μm	0,15	0,21	0,12	0,03

Примечание: * – достоверно при $p \leq 0,05$.
Note: * – significant at $p \leq 0,05$.

вертикальной миграции соединений кальция. Содержание ПФ радия в обоих типах почв достоверно коррелировало с его валовым содержанием. Связь концентраций радия в почвах с соотношением в них фракций ФГ и ФП установить не удалось. Однако предыдущими исследованиями показано, что в обоих типах почв максимальное количество радионуклида сосредоточено во фракциях ФГ [7].

Необходимо отметить, что в исследуемой модели наблюдались корреляции отдельных параметров физико-химического состава не только с содержанием радия в почве. Некоторые факторы находились в линейной зависимости друг от друга. К примеру, наблюдалась корреляция содержания фосфора в почве с концентрациями калия (0,81), органического углерода (0,65) и гидролитической кислотностью (0,90); кальция с магнием (0,73), органическим углеродом (0,84), физической глиной (0,64) и рН (0,45), что усложняло задачу построения множественной регрессии. Тем не менее, построение регрессии методом последовательного включения факторов позволило выявить разницу в свойствах почв, непосредственно влияющих на подвижность радионуклида. Согласно полученным уравнениям валовое содержание радия в исследуемых загрязнённых почвах (независимо от типа) более всего зависело от содержания в них органического углерода и фосфора:

$$^{226}\text{Ra}_{(\text{вал})} = 0,629 \text{P}_2\text{O}_5 + 0,622 \text{C}_{\text{орг}} \quad (R^2 = 0,982, p < 0,001).$$

При этом, содержание ПФ радионуклида, напрямую зависящее от его валовой концентрации, было связано с такими характеристиками физико-химического состава почв как содержание органического углерода, а также обменных катионов кальция и магния:

$$^{226}\text{Ra}_{(\text{ПФ})} = 0,536 \text{Ra}_{(\text{вал})} + 0,567 \text{C}_{\text{орг}} + 0,48 \text{Mg}^{2+} + 0,44 \text{Ca}^{2+} \quad (R^2 = 0,718, p < 0,001).$$

Содержание радия в растениях также зависело от ряда показателей физико-химического состава почв. Результаты корреляционного анализа совокупности всех данных показали достоверную корреляцию с валовым содержанием радия в почве ($r = 0,63, p \leq 0,05$), при этом с содержанием его ПФ связь оказалась менее значимой ($r = 0,30$). Достоверная корреляция содержания радия в растениях также была получена с содержанием ФП ($r = 0,62, p \leq 0,05$), из чего следует, что в почвах с большей долей песчаных фракций доступность радионуклида будет увеличиваться. К числу факторов, имеющих отношение к процессу биологического поглощения радия можно отнести также

содержание органического углерода в почве ($r = 0,52, p \leq 0,05$) и калия ($r = 0,47, p \leq 0,05$). Слабые корреляции были получены с содержанием фосфора ($r = 0,38$) и кальция ($r = 0,35$).

Таким образом, основные факторы, влияющие на распределение радионуклида в почве, опосредованно влияли и на его содержание в растениях. Однако, если содержание радионуклида в почве, особенно его ПФ, достоверно коррелировало с концентрацией его химического аналога кальция, то с содержанием радионуклида в растении эта связь оказалась слабовыраженной. Кальций играет важную роль в процессе роста и питания растений. Показано, что при его повышенном содержании в почвах интенсивность поступления радия в растения может снижаться [19]. Возможно, это связано с конкуренцией щелочноземельных металлов за адсорбционные центры на поверхности корня. Радий имеет преимущество в этой конкуренции из-за большого ионного радиуса. Но так как в почвенном растворе он обычно представлен в предельно низких концентрациях, то в присутствии щелочноземельных элементов в высоких концентрациях поглощение радия может подавляться [1, 13, 19]. Низкая же доступность кальция в почве может вызвать антагонистический эффект поглощения радия растительностью, что связано с нарушением гомеостатического равновесия в растении [20].

Заключение

Поглощение радия-226 растениями является сложным многофакторным процессом, на который значительное влияние оказывает физико-химический состав почв. Исследование аккумулирующих свойств растений *C. angustifolium*, *L. pratensis*, *L. vernus* не выявило достоверных межвидовых различий в накоплении радионуклида, однако были обнаружены значительные различия в его накоплении растениями на участках с разным типом почв и загрязнений. Полученные результаты свидетельствовали, что содержание радионуклида в исследуемых видах растений более всего зависело от его валового содержания в почве и в меньшей степени от содержания выделенных ПФ радионуклида. Предикторами повышенных концентраций валового радия в исследуемых техногенных почвах являлось содержание фосфора и органического углерода. Концентрации ПФ радионуклида были связаны также с содержанием катионов кальция и магния, что подтверждалось данными мно-

жественного регрессионного анализа. К числу ведущих факторов подвижности радия можно также отнести актуальную и потенциальную кислотности почвенного раствора.

Факторы, влияющие на миграционную способность радионуклида в почвах, опосредованно влияли и на его содержание в растениях. Результаты корреляционного анализа показали, что к числу наиболее значимых можно отнести содержание органического углерода, калия, фосфора, соотношение ФП и ФГ. Несмотря на то, что содержание ПФ радия в почвах достоверно коррелировало с содержанием обменных катионов кальция и магния, выраженной связи между содержанием радионуклида в растениях и вышеуказанными щелочноземельными элементами выявлено не было.

Работа выполнена в рамках Госзадания № АААА-А18-118011190102-7.

Автор выражает благодарность с.н.с., к.б.н. И. И. Шуктомовой, зав. лаб., к.б.н. Н. Г. Рачковой, сотрудникам лабораторий миграции радионуклидов и радиохимии и «Экоаналит» ИБ Коми НЦ УрО РАН.

Литература

1. Алексахин Р.М., Архипов Н.П., Бархударов Р.М., Василенко И.Я., Дричко В.Ф., Иванов Ю.А., Маслов В.И., Маслова К.И., Никифоров В.С., Поликарпов Г.Г., Попова О.Н., Сироткин А.Н., Таскаев А.И., Тестов Б.В., Тигарева Н.А., Февралева Л.Т. Тяжёлые естественные радионуклиды в биосфере: Миграция и биологическое действие на популяции и биогеоценозы. М.: Наука, 1990. 368 с.
2. Chen S.B., Zhu Y.G., Hu Q.H. Soil to plant transfer of ^{238}U , ^{226}Ra and ^{232}Th on a uranium mining-impacted soil from southeastern China // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2005. V. 82 (2). P. 223–236.
3. Hu N., Ding D., Li G., Zheng Ji., Li L., Zhao W., Wang Y. Vegetation composition and ^{226}Ra uptake by native plant species at a uranium mill tailings impoundment in South China // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2014. V. 129. P. 100–106.
4. Vandenhove H. Phytomanagement of radioactively contaminated sites // *Phytoremediation of Metal-Contaminated Soils*. Springer, 2006. P. 191–228.
5. Nezami S., Malakouti M.J., Samani A.B., Maragheh M.G. Effect of low molecular weight organic acids on the uptake of ^{226}Ra by corn (*Zea mays* L.) in a region of high natural radioactivity in Ramsar Iran // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2016. V. 164. P. 145–150.
6. Старик И.Е. Основы радиохимии. Л.: Наука, 1969. 247 с.
7. Noskova L.M., Shuktomova I.I. Radium distribution in anthropogenic soils as a function of soil physicochemical and mineralogical parameters // *Geochemistry International*. 2015. V. 53. No. 11. P. 1012–1018. doi: 10.1134/S0016702915090050.
8. Chao J.H., Chuang C.Y. Accumulation of radium in relation to some chemical analogues in *Dicranopteris linearis* // *Applied Radiation and Isotopes*. 2011. V. 69. P. 261–267.
9. Vandenhove H., Van Hees M. Predicting radium availability and uptake from soil properties // *Chemosphere*. 2007. V. 69 (4). P. 664–674.
10. Vandenhove H., Olyslaegers G., Sanzharova N., Shubina O., Reed E., Shang Z., Velasco H. Proposal for new best estimates of the soil-to-plant transfer factor of U, Th, Ra, Pb and Po // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2009. V. 100 (9). P. 721–732.
11. Гиль Т.В. Влияние pH среды на поглощение радия типичной сильноподзолистой почвой (в экспериментальных условиях) // Миграция и биологическое действие естественных радионуклидов в условиях северных биогеоценозов: Тр. Коми филиала АН СССР № 46. Сыктывкар, 1980. С. 58–64.
12. Hewamanna R., Samarkoon C.M., Kurunaratne P.A.V.N. Concentration and chemical distribution of radium in plants from monazite-bearing soils // *Environ. Exp. Plant Bot.* 1988. V. 28. P. 137–143.
13. Lauria D.C., Ribeiro F.C.A., Conti C.C., Loureiro F.A. Radium and uranium levels in vegetables grown using different farming management systems // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2009. V. 100. P. 176–183.
14. Uchida S., Tagami K. Soil-to-crop transfer factors of radium in Japanese agricultural fields // *Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences*. 2007. V. 8 (2). P. 137–142.
15. Таскаев А.И. Закономерности распределения и миграции изотопов U, Th, Ra и Rn в почвенно-растительном покрове района повышенной естественной радиации: Дисс... канд. биол. наук. Сыктывкар, 1978. 137 с.
16. Medley P., Bollhofer A. Influence of group II metals on Radium-226 concentration ratios in the native green plum (*Buchanania obovata*) from the Alligator Rivers Region, Northern Territory, Australia // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2016. V. 151. P. 551–557.
17. Рачкова Н.Г. Роль сорбентов в процессах трансформации соединений урана, радия и тория в подзолистой почве: Автореф. дисс... канд. биол. наук. Сыктывкар, 2006. 22 с.
18. Рачкова Н.Г., Зайнуллин В.Г. Моделирование подвижности радия-226 в загрязнённых подзолистых почвах на основе данных регрессионного анализа // Актуальные проблемы региональной экологии и биодиагностика живых систем: Материалы XIII Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Киров, 2015. Книга 2. С. 194–197.
19. Таскаев А.И., Овченков В.Я., Алексахин Р.М., Шуктомова И.И. Поступление ^{226}Ra в растения и измене-

ние его состояний в звене почва-надземная масса-опад // Почвоведение. 1977. № 2. С. 42–48.

20. Pulhani V.A., Dafauti S., Hegde A.G., Sharma R.M., Mishra U.C. Uptake and distribution of natural radioactivity in wheat plants from soil // Journal of Environmental Radioactivity. 2005. V. 79. No. 3. P. 331–346.

References

1. Aleksakhin R.M., Arkhipov N.P., Barkhudarov R.M., Vasilenko I.Ya., Drichko V.F., Ivanov Yu.A., Maslov V.I., Maslova K.I., Nikiforov V.S., Polikarpov G.G., Popova O.N., Sirotkin A.N., Taskaev A.I., Testov B.V., Titayeva N.A., Fevrалеva L.T. Heavy natural radionuclides in biosphere: Migration and biological effects on population and biogeocenoses. Moskva: Nauka, 1990. 368 p. (in Russian).

2. Chen S.B., Zhu Y.G., Hu Q.H. Soil to plant transfer of ^{238}U , ^{226}Ra and ^{232}Th on a uranium mining-impacted soil from southeastern China // Journal of Environmental Radioactivity. 2005. V. 82 (2). P. 223–236.

3. Hu N., Ding D., Li G., Zheng Ji., Li L., Zhao W., Wang Y. Vegetation composition and ^{226}Ra uptake by native plant species at a uranium mill tailings impoundment in South China // Journal of Environmental Radioactivity. 2014. V. 129. P. 100–106.

4. Vandenhove H. Phytomanagement of radioactively contaminated sites // Phytoremediation of Metal-Contaminated Soils. Springer, 2006. P. 191–228.

5. Nezami S., Malakouti M.J., Samani A.B., Maragheh M.G. Effect of low molecular weight organic acids on the uptake of ^{226}Ra by corn (*Zea mays* L.) in a region of high natural radioactivity in Ramsar Iran // Journal of Environmental Radioactivity. 2016. V. 164. P. 145–150.

6. Starik I.E. Fundamentals of radiochemistry. Leningrad: Nauka, 1969. 247 p. (in Russian).

7. Noskova L.M., Shuktomova I.I. Radium distribution in anthropogenic soils as a function of soil physico-chemical and mineralogical parameters // Geochemistry International. 2015. V. 53. No. 11. P. 1012–1018. doi: 10.1134/S0016702915090050.

8. Chao J.H., Chuang C.Y. Accumulation of radium in relation to some chemical analogues in *Dicranopteris linearis* // Applied Radiation and Isotopes. 2011. V. 69. P. 261–267.

9. Vandenhove H., Van Hees M. Predicting radium availability and uptake from soil properties // Chemosphere. 2007. V. 69 (4). P. 664–674.

109. Vandenhove H., Olyslaegers G., Sanzharova N., Shubina O., Reed E., Shang Z., Velasco H. Proposal for new

best estimates of the soil-to-plant transfer factor of U, Th, Ra, Pb and Po // Journal of Environmental Radioactivity. 2009. V. 100 (9). P. 721–732.

11. Gil T.V. The influence of the pH of the medium on the absorption of radium by a typical strongly podzolic soil (under experimental conditions) // Migration and biological action of natural radionuclides under conditions of northern biogeocenoses: Tr. Komi filiala AN SSSR. No. 46. Syktyvkar, 1980. P. 58–64 (in Russian).

12. Hewamanna R., Samarkoon C.M., Kurunaratne P.A.V.N. Concentration and chemical distribution of radium in plants from monazite-bearing soils // Environ. Exp. Plant Bot. 1988. V. 28. P. 137–143.

13. Lauria D.C., Ribeiro F.C.A., Conti C.C., Loureiro F.A. Radium and uranium levels in vegetables grown using different farming management systems // Journal of Environmental Radioactivity. 2009. V. 100. P. 176–183.

14. Uchida S., Tagami K. Soil-to-crop transfer factors of radium in Japanese agricultural fields // Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences. 2007. V. 8 (2). P. 137–142.

15. Taskaev A.I. Regularities in the distribution and migration of U, Th, Ra and Rn isotopes in the soil-vegetation cover of the region of increased natural radiation: Diss. ... kand. biol. nauk. Syktyvkar, 1978. 137 p. (in Russian).

16. Medley P., Bollhofer A. Influence of group II metals on Radium-226 concentration ratios in the native green plum (*Buchanania obovata*) from the Alligator Rivers Region, Northern Territory, Australia // Journal of Environmental Radioactivity. 2016. V. 151. P. 551–557. doi: 10.1016/j.jenvrad.2015.07.013.

17. Rachkova N.G. The role of sorbents in the processes of transformation of uranium, radium and thorium compounds in podzolic soil: Avtoref. diss... kand. biol. nauk. Syktyvkar, 2006. 22 p. (in Russian).

18. Rachkova N.G., Zaynullin V.G. Modeling the mobility of radium-226 in contaminated podzolic soils based on regression analysis data // Actual problems of regional ecology and biodiagnosis of living systems: Materialy XIII Vseross. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiyem. Kirov, 2015. Kniga 2. P. 194–197 (in Russian).

19. Taskaev A.I., Ovchenkov V.Ya., Aleksakhin R.M., Shuktomova I.I. The uptake of ^{226}Ra by plants and the change in its states in the soil-overground mass-fall // Pochvovedenie. 1977. No. 2. P. 42–48. (in Russian).

20. Pulhani V.A., Dafauti S., Hegde A.G., Sharma R.M., Mishra U.C. Uptake and distribution of natural radioactivity in wheat plants from soil // Journal of Environmental Radioactivity. 2005. V. 79. No. 3. P. 331–346.