

Фиторемедиационный потенциал иван-чая узколистного и канареечника тростниковидного в условиях полиэлементного загрязнения

© 2023. Л. М. Шапошникова, к. б. н., н. с.,
О. В. Раскоша, к. б. н., зав. отделом,
Н. Г. Рачкова, к. б. н., зав. лабораторией,

Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения
Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: shaposhnikova.l.m@ib.komisc.ru

Исследовано содержание более 20 химических элементов, включая естественные радионуклиды (U, ^{226}Ra), а также некоторые эссенциальные и потенциально токсичные элементы в аллювиально-дерновой почве на территории бывшего радиевого промысла (Республика Коми), загрязнённой в результате разлива на поверхность почвы отработанных высокоминерализованных пластовых вод. На примере канареечника тростниковидного и иван-чая узколистного изучено накопление этих химических элементов в растениях. Подтверждено, что их содержание в почве повышено по сравнению с соответствующими фоновыми уровнями, а интенсивным переходом из корневой части растений в надземную биомассу отличаются эссенциальные элементы К, Р, Mg и Са. В значимых количествах и в надземной, и в подземных частях растений определяются Zn, Mn и Cu. Токсичные и потенциально токсичные химические элементы преимущественно аккумулированы в корневой системе, что является механизмом сдерживания для поступления поллютантов в надземную часть растений и способствует стабилизации их состояния в почве исследуемой зоны загрязнения.

Ключевые слова: пластовые высокоминерализованные воды, почва, уран, радий, элементный состав, *Phalaris arundinacea*, *Chamaenerion angustifolium*, фиторемедиация.

Phytoremediation potential of willow herb and reed canary grass under conditions of polyelemental pollution

© 2023. L. M. Shaposhnikova ORCID: 0000-0002-4181-4903*
O. V. Raskosha ORCID: 0000-0003-4104-1717*
N. G. Rachkova ORCID: 0000-0002-7966-7945*

Institute of Biology of Komi Science 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

We investigated elemental composition of alluvial-sod soil, which was polluted by spilling radium enriched highly mineralized ground waters (Komi Republic) in 1930–1950s. It was revealed that content of more than 20 chemical elements, including U and ^{226}Ra , some essential and potentially toxic elements, was higher compared to uncontaminated background. Accumulation of these elements in canary grass (*Phalaris arundinacea* L.) and willow herb (*Chamaenerion angustifolium* L.) Scop.) was estimated by bioconcentration factor (BCF) equal to the ratio of the concentrations of chemical elements in the aboveground parts of plants and soils, as well as root barrier factor (RBF), equal to the ratio of the concentration of elements in the underground and aboveground parts of plants. The highest BCFs were more than 11 for potassium in both species and 3.7 and 10.5 for phosphorus in canary grass and willow herb, respectively. BCF for copper in both cases were close to 1. BCFs for Mg, Ca, Zn, Na, Mn and Sr ranged from 0.06 to 0.37. The minimal BCFs (< 0.03) were observed in the case of ^{226}Ra for canary grass and U, Fe, Ba, V, Al, and Pb for both plant species. Transfer from roots to aboveground parts of plants was highest for essential elements K, P, Mg, and Ca (RBF < 1). RBFs of Zn and Cu were < 1 in case of willow herb and > 1 for canary grass. Roots of both plant species accumulated U, ^{226}Ra , Pb, V, As, Al, Fe, Na, Ba, and Sr in higher concentrations than aboveground parts. The obtained data suggests that both plants contribute to decrease in bioavailability of pollutants due to root barrier that reduces the migration of potentially toxic elements from soil to plants and can be potential phytostabilizers for these pollutants. In the case of canary grass, root barrier function observed to greater extent.

Keywords: highly mineralized ground water, uranium, radium, soil, elemental composition, *Phalaris arundinacea*, *Chamaenerion angustifolium*, phytoremediation.

Пластовые высокоминерализованные воды являются источником загрязнения окружающей среды, способным выносить на поверхность почвы множество химических элементов, в число которых входят потенциально опасные тяжёлые металлы и радионуклиды в количествах, не характерных для поверхностных слоёв почвы [1, 2]. В Республике Коми подобные загрязнения появились в 1930–1950 гг. в результате деятельности радиохимических заводов по производству радия, который добывали из подземных высокоминерализованных вод. По химическому составу они относились к бессульфатным хлоридно-натриево-кальциевым рассолам, богатым Na, K, Li, Ca, Ba, Mg, Sr, Fe, Al, Mn, Cl [3]. Вследствие разлива на поверхности почвы оработанных на производстве пластовых вод образовались участки с полиэлементным загрязнением, на которых радиоактивный фон был повышен.

Со временем попавшие на поверхность химические элементы вовлекались в биогенный обмен [4–7]. Растениям в нём принадлежит важная роль, так как они являются ключевым звеном пищевых цепей. Эта роль особо значима в условиях, когда в круговорот включается избыточное количество токсикантов и определяется такими факторами, как концентрации элементов в надземных и подземных органах растений, количество биомассы и скорость её минерализации [4]. Также благодаря аккумулярующим свойствам растения могут способствовать очищению почв, что явилось основанием для разработки различных фиторемедиационных технологий восстановления загрязнённых и нарушенных территорий [8].

Цель нашей работы состояла в изучении элементного состава почвы, загрязнённой вследствие разлива оработанных высокоминерализованных вод с повышенным содержанием радия, а также аккумулярующей способности некоторых видов растений в отношении этих химических элементов для оценки их фиторемедиационного потенциала.

Объекты и методы исследования

Работы проводили в 2018–2019 гг. Исследуемый участок расположен в пойме р. Ухта на аллювиально-дерновой почве. Его растительный покров сформирован разнотравно-злаковым сообществом. Загрязнение участка обусловлено сбросом на поверхность почвы оработанных пластовых вод после добычи из них радия. В качестве

контрольной площадки был выбран участок, расположенный в 15 км выше по течению р. Ухта от загрязнённого, со сходным типом почвы и флористическим составом.

Для определения элементного состава отбирали образцы почвы из верхнего (0–20 см) слоя. Всего отобрано 27 образцов почвы на загрязнённом участке и 9 образцов на контрольном участке. Для изучения аккумулярующей способности и фиторемедиационного потенциала были выбраны два вида крупных многолетних дикорастущих растения с развитой корневой системой, произрастающих в зоне загрязнения. Это представитель семейства кипрейных (Onagraceae) иван-чай узколистный *Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop. и злак канареечник тростниковидный *Phalaris arundinacea* L. Последний часто используется в исследованиях по биоиндикации и фитодезактизации почв [9, 10]. По три образца каждого вида растения выкапывали вместе с корнями, отделяли надземную часть, подземную часть очищали от почвы и промывали водой. Перед химическим анализом обе части растений высушивали на воздухе и измельчали на мельнице. Пробы почвы высушивали и просеивали через сито 1 мм. Аккумулярующую способность растений в отношении химических элементов оценивали по двум показателям – коэффициенту накопления (КН), равному отношению концентраций химических элементов в надземной части растения и почве, и коэффициенту корневого барьера ($K_{\text{кб}}$), равному отношению концентраций химических элементов в корневой и надземной части растений.

Массовую долю нерадиоактивных химических элементов в объектах исследования определяли на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS, Spectro Ciros^{CCD}, Germany) в экоаналитической лаборатории ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. Содержание радионуклидов ²²⁶Ra и U анализировали радиохимическими методами из предварительно озолённых при 450 °C образцов в Лаборатории миграции радионуклидов и радиохимии ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН на приборах «Альфа-1» и «ЛЮФ-57» соответственно. Все измерения проводили в трёхкратной повторности. Различия между группами данных оценивали с помощью однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA). Зависимости между содержанием химических элементов в почвах оценивали с помощью корреляционного анализа (Statistica, version 13.3).

Результаты и обсуждение

Концентрации ^{226}Ra в озолённых образцах почв загрязнённого участка составили 1,36–74,5 Бк/г. Это превышало показатели, соответствующие почве контрольного участка, в которой среднее содержание радионуклида отвечало уровню $40,6 \pm 10,8$ мБк/г. Концентрации урана в загрязнённой почве находились в пределах диапазона 0,86–3,69 мкг/г при среднем фоновом содержании $1,01 \pm 0,03$ мкг/г. Концентрации других химических элементов в образцах загрязнённых почв, в сравнении с контрольным участком, были также достоверно выше (ANOVA, $p < 0,05$) (табл. 1).

Наибольшее превышение фоновых показателей было характерно для содержания щелочноземельных элементов Ca, Ba и Sr – около 12, 50 и 88 крат соответственно, по Mg – в 5 раз. Так же как и в случае с ^{226}Ra , для этих элементов был характерен широкий диапазон варьиро-

вания. Являясь химическими аналогами, они сходны по интенсивности миграции в водных средах, и это обуславливает включение радия в процессы распределения макроэлементов в абиотических и биотических компонентах [11, 12]. Так, наблюдалась корреляция между содержаниями в почвенных образцах ^{226}Ra и Ba ($r = 0,59, p \leq 0,05$), ^{226}Ra и Sr ($0,74, p \leq 0,05$). Достоверной корреляции между содержанием ^{226}Ra и Ca, ^{226}Ra и Mg получено не было, но в то же время между содержанием Ca и Mg корреляция была тесной ($0,82, p \leq 0,05$).

Кратность превышения концентрации других элементов в почве загрязнённого участка по отношению к контролю составила от 1,5 до 5,9. Минимальным содержанием в почвах исследуемой территории характеризовались Cd и Se, хотя по сравнению с контрольными значениями их концентрации также были выше. Многие микроэлементы являются потенциально токсичными для живых организмов,

Таблица 1 / Table 1
Элементный состав почв загрязнённого и контрольного участков
Elemental composition of soils of contaminated and control sites

Химический элемент Chemical element	Содержание ($x \pm Sd$), мг/кг / Content ($x \pm Sd$), mg/kg	
	загрязнённый участок contaminated site	контрольный участок control site
Fe	25000±7000	8100±2200
Ca	20000±6000	1700±500
Al	11300±2900	6500±1700
Mg	6600±2000	1300±400
Ba	2100±900	41±12
K	2100±800	1100±500
Mn	990±290	290±90
S	960±290	190±60
Sr	800±130	9,0±2,6
P	740±220	510±150
Na	200±80	34±13
Zn	125±25	30±6
V	50±12	15,5±3,8
Ni	22±8	6,5±2,3
Cu	20±4	4,4±0,9
Cr	15,5±3,0	10,0±2,0
Pb	10,2±2,6	6,2±1,6
Co	8,2±3,2	3,4±1,4
As	6,6±3,3	1,7±0,9
Cd	0,77±0,37	0,15±0,08
Se	0,36±0,15	–

Примечание: x – среднее значение, Sd – стандартное отклонение, «–» – нет данных.
Note: x – mean value, Sd – standart deviation, “–” – no data.

если их концентрация в почве превышает допустимые уровни. К таковым относятся металлы (Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sn, V и Zn), некоторые металлоиды (As, Sb) и неметаллы (Se) [13]. Валовые концентрации некоторых из них в исследуемой почве превышали установленные предельно допустимые концентрации (ПДК) [14]. Так, концентрация As варьировали в диапазоне от 1 до 4 ПДК, Cu – 3–13 ПДК, Zn – 2–12 ПДК, Ni – 3–8 ПДК, Co – 1–3 ПДК, Cr – 1–5 ПДК. В то же время концентрации свинца, ванадия и марганца не превышали предельно допустимых значений и находились в пределах 0,2–0,5 ПДК, 0,2–0,6 ПДК и 0,2–1,2 ПДК соответственно. Таким образом, полученные данные свидетельствуют об изменении состава геохимической среды вследствие поступления отработанных минерализованных вод на поверхность почвы. Это выражено не только в повышении содержания в ней целого ряда химических элементов по сравнению с фоновыми значениями, но и, в некоторых случаях, в превышении их предельно допустимых, установленных нормативами, концентраций [14].

Согласно полученным данным, растения из зоны загрязнения в разной степени накапливали и радионуклиды, и нерадиоактивные элементы. Иван-чай узколистый, в сравнении с канареечником тростниковидным, отличался более высоким поглощением радия-226 (табл. 2, 3). Значения КН для иван-чая и канареечника составили 0,22 и 0,02 соответственно.

Более высокое поглощение в случае иван-чая наблюдалось и для других щелочноземельных элементов. Исключение составил барий, КН которого для этих двух видов растений не отличались. В то же время, по урану значимых различий для этих показателей зафиксировано не было ($KH_U = 0,01$ и $0,03$ соответственно).

В целом, закономерности накопления химических элементов растениями обоих видов были сходны. Самые высокие КН мы наблюдали для калия и фосфора. Следующей в этом ряду была медь, её КН были близки к 1. Такие элементы как Mg, Ca, Zn, Na, Mn и Sr накапливались в меньшей степени. Их значения КН находились в пределах от 0,06 до 0,37. Минимальные КН (до 0,03) отмечали для Fe, Ba, V, Al и Pb.

Известно, что химические элементы накапливаются в вегетативных органах по-разному [9, 10]. Некоторые из них аккумулируются преимущественно корнями растений, другие поступают в надземную массу [4, 15]. На этих свойствах растений основаны два разных метода фиторемедиации загрязнённых территорий. Растения потенциально могут использоваться в качестве фитоэкстрагентов для удаления загрязнителей из почвы путём их концентрирования в надземной массе, либо фитостабилизаторов – для стабилизации состояния металлов в почвах посредством сорбции корнями, осаждения, комплексообразования или снижения их подвижности в ризосфере [8]. Согласно полученным данным,

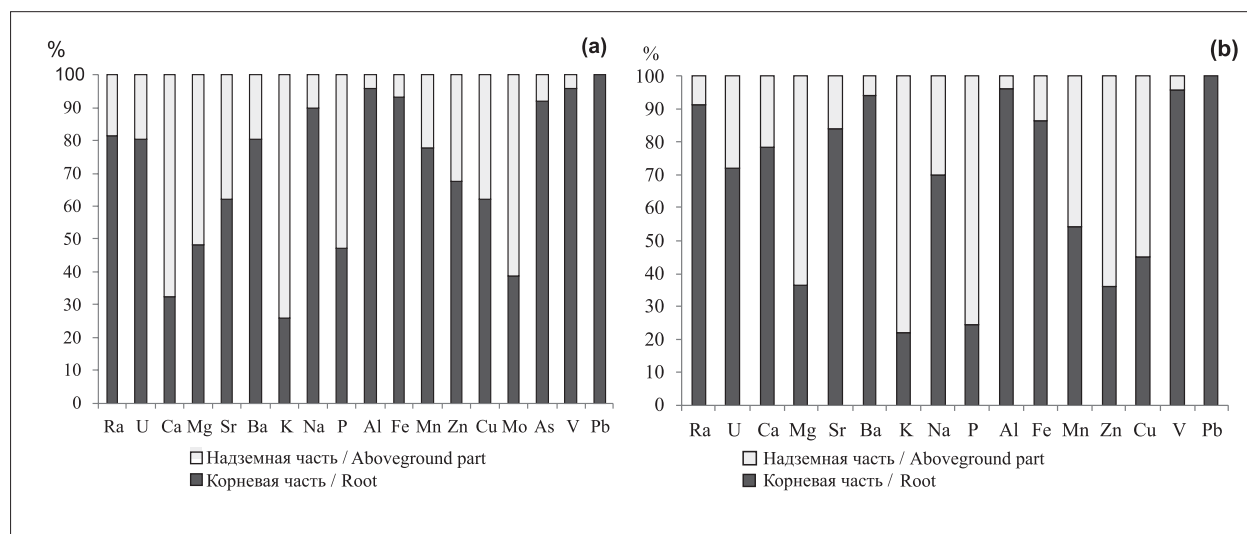


Рис. Относительное содержание радионуклидов и других химических элементов в подземной и надземной частях канареечника тростниковидного (а) и иван-чая узколистого (б).

Содержание Pb в подземной части приняли за 100%, так как его концентрация в надземной биомассе была ниже предела обнаружения

Fig. The ratio of concentrations of radionuclides and microelements in the underground and aboveground parts of the *P. arundinacea* (a) and *C. angustifolium* (b). Pb content in the roots was taken as 100%, since its concentration in the aboveground biomass was below detection limit

в распределении различных элементов между надземными и подземными частями растений наблюдались как сходные признаки, так и различия (рис.).

Интенсивным переходом из корневой части в надземную ($K_{\text{кб}} < 1$) отличались кальций, магний, фосфор и калий (табл. 2, 3). При этом, если распределение магния в канареечнике было равномерным, то в зелёной массе иван-чая его содержание было в 1,8 раз больше, чем в корневой части. Концентрация кальция в надземной части иван-чая была в 1,5 раза выше, чем в канареечнике. При этом значение $K_{\text{кб}}$ для иван-чая также превышало соответствующее значение для канареечника. Анализ данных указывает на то, что кальций содержится в высоких концентрациях и в подземной, и в надземной частях иван-чая узколистного. В целом, из всех щелочноземельных элементов, кальций и магний наиболее интенсивно переходят в фитомассу, что, безусловно, связано с их активной физиологической и биохимической ролью в организме растения [16]. Значительный переход в надземную часть растений наблюдался и для других жизненно важных элементов. В частности, из всех исследованных химических элементов $K_{\text{кб}}$ калия были наиболее

низкими – 0,34 и 0,28 для канареечника и иван-чая соответственно (табл. 2). Фосфор в обоих видах растений также имел $K_{\text{кб}} < 1$.

Такие элементы как Cu, Fe, Mn, Mo, Ni и Zn при низких концентрациях незаменимы, но при высоких содержаниях являются потенциально токсичными для растений [13, 17]. Наши исследования показали, что как в подземной, так и в надземной частях растений **Zn, Mn и Cu обнаруживаются в значимых количествах** (рис.). Однако их переход в надземную часть иван-чая узколистного происходит интенсивнее, чем у канареечника (табл. 2 и 3).

Полученные данные свидетельствуют, что многие химические элементы, поступая в растения, способны концентрироваться в их подземных частях. Так, во всех случаях содержание радионуклидов U и ^{226}Ra в корнях было выше, чем в надземной биомассе (ANOVA, $p \leq 0,05$). Среди нерадиоактивных химических элементов преимущественно корневое накопление имели Pb, V, As, Al, Fe, Na, Ba и Sr (табл. 2 и 3). Наиболее высокие коэффициенты корневого барьера были характерны для ванадия (около 22), мышьяка (11), алюминия (23–25). Значения $K_{\text{кб}}$ бария составили 4,12 в случае иван-чая и 23,7 – в случае канареечника. Для

Таблица 2 / Table 2

Элементный состав и характеристики биопоглощения у канареечника тростниковидного
Elemental composition and characteristics of bioabsorption in *Phalaris arundinacea*

Химический элемент Chemical element	Содержание ($x \pm Sd$) / Content ($x \pm Sd$)		F	p	KH BCF	$K_{\text{кб}}$ RBF
	надземная часть aboveground part	подземная часть underground part				
^{226}Ra	0,04±0,02	0,19±0,01	41,1	0,003	0,02	4,75
U	0,020±0,007	0,06±0,01	33,3	0,004	0,01	3,00
Ca	7100±1700	3400±600	34,3	0,004	0,35	0,48
Mg	1400±100	1300±100	3,00	0,158	0,21	0,93
Sr	58±14	95±23	5,54	0,078	0,06	1,64
Ba	36±7	150±40	20,7	0,010	0,02	4,12
K	23700±1200	8300±600	407	0,00004	11,5	0,34
Na	61±24	550±210	16,1	0,016	0,31	8,97
P	2700±100	2400±900	0,34	0,592	3,66	0,89
Al	220±130	5100±700	143,7	0,0003	0,02	23,2
Fe	470±290	6600±500	377,8	0,00004	0,02	13,9
Mn	140±50	470±200	7,75	0,049	0,14	3,48
Zn	46±15	95±12	20,1	0,011	0,37	2,09
Cu	20±9	32±12	1,16	0,342	0,99	1,63
As	0,17±0,08	1,90±0,26	74,2	0,003	0,03	11,2
V	0,95±0,36	21,3±3,2	117,0	0,0004	0,02	22,4

Примечание (здесь и в табл. 3): содержание ^{226}Ra приведено в Бк/г, U – в мкг/г, остальных элементов – в мг/кг; «–» – нет данных, x – среднее значение, Sd – стандартное отклонение, F и p – критическое значение критерия Фишера и уровень значимости (ANOVA), $df = 1$; KH – коэффициент накопления, $K_{\text{кб}}$ – коэффициент корневого барьера.

Note (here and Table 3): content of ^{226}Ra is given in Bq/g, U – $\mu\text{g/g}$, other elements – mg/kg; “–” – no data, x – mean value, Sd – standart deviation, F and p – critical value of the Fisher criterion and significance level (ANOVA), $df = 1$; BCF – bioconcentration factor, RBF – root barrier factor.

Таблица 3 / Table 3

Элементный состав и характеристики биопоглощения у иван-чая узколистного
Elemental composition and characteristics of bioabsorption in *Chamaenerion angustifolium*

Химический элемент Chemical element	Содержание ($x \pm Sd$) / Content ($x \pm Sd$)		F	p	КН BCF	$K_{кб}$ RBF
	надземная часть aboveground part	подземная часть underground part				
^{226}Ra	0,10±0,02	0,52±0,16	7,37	0,049	0,22	5,20
U	0,050±0,006	0,08±0,007	13,5	0,021	0,03	1,60
Ca	10300±1200	40000±15000	12,4	0,024	0,51	3,87
Mg	4300±900	2500±500	9,99	0,034	0,66	0,57
Sr	111±34	610±260	10,4	0,032	0,12	5,47
Ba	32±15	760±260	50,7	0,005	0,02	23,7
K	24000±6000	6800±2500	8,36	0,044	11,8	0,28
Na	65±31	150±26	13,2	0,022	0,33	2,31
P	7700±1700	2400±240	9,98	0,032	10,5	0,31
Al	71±30	1770±250	131,0	0,0003	0,01	24,9
Fe	580±110	2700±1400	5,48	0,079	0,02	4,68
Mn	70±22	82±12	0,67	0,459	0,07	1,17
Zn	57±14	31,3±2,9	8,73	0,048	0,45	0,55
Cu	14,7±2,1	11,9±0,8	4,51	0,101	0,73	0,81
V	0,56±0,18	12,5±2,8	54,6	0,002	0,01	22,3

многих потенциально опасных химических элементов корни выступают в качестве барьера для перехода в зелёную массу растений. Особое значение это имеет в случае элементов, таких как As и Pb, токсичных даже в следовых количествах [13, 17]. Накопление в корневой части позволяет существенно снизить их подвижность и биологическую доступность. Заметим, что свинец в значительных количествах обнаруживался только в этой части растений (рис.), в то время как в надземных частях его концентрации были ниже предела обнаружения. Это согласуется с данными литературы, касающимися другого распространённого злака – полевицы тонкой (*Argostis tenuis* Sibth.) [4].

Несмотря на общность признаков распределения радионуклидов и потенциально токсичных химических элементов в растениях обоих видов, содержание Cu, Al, Fe, Mn, Zn, V, Pb в корнях канареечника были в 1,7–5,7 раз выше в сравнении с иван-чаем, при этом переход Cu, Mn, Zn из корневой в надземную часть иван-чая происходил интенсивней, на что указывают их $K_{кб}$. Таким образом, корни канареечника тростниковидного более эффективно выполняли барьерные функции в отношении потенциально токсичных элементов по сравнению с корневой системой иван-чая. В литературе имеются данные, что в корневой части канареечника тростниковидного хорошо накапливаются и другие металлы, такие как Co и Cd, в связи с чем авторы делают заключение

о хороших фитостабилизирующих свойствах этого растения в отношении этих металлов [9]. В целом, анализ полученных данных позволяет предположить, что оба растения – и канареечник, и иван-чай вносят вклад в снижение подвижности и биологической доступности поллютантов в исследуемой загрязнённой экосистеме. Однако в случае канареечника тростниковидного механизмы этих процессов теснее связаны с барьерной функцией корней растения.

Заключение

Представленные результаты свидетельствуют о существенном влиянии бывшего радиодобывающего предприятия в Республике Коми на окружающую биогеохимическую среду. Локальный разлив отработанных на производстве высокоминерализованных пластовых вод, содержащих радионуклиды, сопровождался не только увеличением в почве их содержания, но и повышением концентрации целого ряда нерадиоактивных, в том числе потенциально токсичных, элементов, впоследствии активно вовлекающихся в биогенный обмен. На примере канареечника тростниковидного и иван-чая узколистного показано, что в высоких концентрациях в растениях накапливаются эссенциальные элементы, такие как K, P, Mg, Ca. Экспериментально подтверждено, что большая часть исследованных

химических элементов (U, ²²⁶Ra, Pb, V, As, Al, Fe, Na, Ba, Sr) аккумулируется в подземной части растений. В основном, это элементы, которые являются токсичными или потенциально токсичными для растений. Полученные результаты указывают, что исследуемые виды растений являются потенциальными фитостабилизаторами для подобных полиэлементных загрязнений.

Работа выполнена при финансовой поддержке госбюджетной темы отдела радиоэкологии Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН № 122040600024-5 при частичной поддержке гранта РФФИ и Правительства Республики Коми № 20-45-110009р_а.

Литература

1. Самтанова Д.Э., Сангаджиева Л.Х. Влияние минерализованных пластовых вод на загрязнение почвенного покрова // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Химия. Биология. Экология. 2013. Т. 13. № 2. С. 96–101.

2. Bzowski Z., Michalik B. Mineral composition and heavy metal contamination of sediments originating from radium rich formation water // Chemosphere. 2015. V. 122. P. 79–87.

3. Евсеева Т.И., Таскаев А.И., Кичигин А.И. Водный промысел. Сыктывкар: Издательство Коми НЦ УрО РАН, 2000. 39 с.

4. Безель В.С., Жуикова Т.В. Химическое загрязнение среды: вынос химических элементов надземной фитомассой травянистой растительности // Экология. 2007. Т. 38. № 4. С. 259–267.

5. Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Chaplygin V.A., Bauer T.V., Burachevskaya M.V., Nevidomskaya D.G., Sushkova S.N., Sherstnev A.K., Zamulina I.V. Content and distribution of heavy metals in herbaceous plants under the effect of industrial aerosol emissions // Journal of Geochemical Exploration. 2017. V. 174. P. 113–120.

6. Briffa J., Sinagra E., Blundell R. Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans // Heliyon. 2020. V. 6. No. 9. Article No e04691.

7. Shtangeeva I., Viksna A., Bertins M., Ryumin A., Grebnevs V. Variations in the concentrations of macro- and trace elements in two grasses and in the rhizosphere soil during a day // Environmental Pollution. 2020. V. 262. Article No. 114265.

8. Ali H., Khan E., Sajad M.A. Phytoremediation of heavy metals – concepts and applications // Chemosphere. 2013. V. 91. P. 869–881.

9. Polechonska L., Klink A. Trace metal bioindication and phytoremediation potentialities of *Phalaris arundinacea* L. (reed canary grass) // Journal of Geochemical Exploration. 2014. V. 146. P. 27–33.

10. Brezinova T., Vymazal J. Evaluation of heavy metals seasonal accumulation in *Phalaris arundinacea* in a constructed treatment wetland // Ecological Engineering. 2015. V. 79. P. 94–99.

11. Рачкова Н.Г., Раскоша О.В. Последствия поступления урана и радия-226 в организмы растений и животных на территории складирования отходов радиевого промысла // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 3. С. 188–195.

12. 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.

13. Antoniadis V., Shaheen S.M., Stark H.-J., Wennrich R., Levizou E., Merbach I., Rinklebe J. Phytoremediation potential of twelve wild plant species for toxic elements in a contaminated soil // Environment International. 2021. V. 146. Article No. 106233.

14. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве: Гигиенические нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2006. 15 с.

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

16. Ермаков В.В., Тютиков С.Ф. Геохимическая экология животных. М.: Наука, 2008. 315 с.

17. Palansooriyaa K.N., Shaheen S.M., Chene S.S., Tsange D.C.W., Hashimoto Y., Houg D., Bolanh N.S., Rinklebe J., Oka Y.S. Soil amendments for immobilization of potentially toxic elements in contaminated soils: A critical review // Environment International. 2020. V. 134. Article No. 105046.

References

1. Samtanova D.E., Sangadzhieva L.H. Influence of the mineralized stratal waters on contamination of soil cover // Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya Khimiya. Biologiya. Ekologiya. 2013. V. 13. No. 2. P. 96–101 (in Russian).

2. Bzowski Z., Michalik B. Mineral composition and heavy metal contamination of sediments originating from radium rich formation water // Chemosphere. 2015. V. 122. P. 79–87. doi: 10.1016/j.chemosphere.2014.10.077

3. Evseeva T.I., Taskaev A.I., Kichigin A.I. Vodnyy promysel. Syktyvkar: Izdatelstvo Komi NTs UrO RAN, 2000. 39 p. (in Russian).

4. Bezel V.S., Zhuikova T.V. Chemical pollution: transfer of chemical elements to the aboveground phytomass of herbaceous plants // Russian Journal of Ecology. 2007. V. 38. No. 4. P. 238–246.

5. Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Chaplygin V. A., Bauer T.V., Burachevskaya M.V., Nevidomskaya D.G.,

Sushkova S.N., Sherstnev A.K., Zamulina I.V. Content and distribution of heavy metals in herbaceous plants under the effect of industrial aerosol emissions // Journal of Geochemical Exploration. 2017. V. 174. P. 113–120. doi: 10.1016/j.gexplo.2016.05.011

6. Briffa J., Sinagra E., Blundell R. Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans // Heliyon. 2020. V. 6. No. 9. Article No. e04691. doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04691

7. Shtangeeva I., Viksna A., Bertins M., Ryumin A., Grebnevs V. Variations in the concentrations of macro- and trace elements in two grasses and in the rhizosphere soil during a day // Environmental Pollution. 2020. V. 262. Article No. 114265. doi: 10.1016/j.envpol.2020.114265

8. Ali H., Khan E., Sajad M.A. Phytoremediation of heavy metals – concepts and applications // Chemosphere. 2013. V. 91. P. 869–881.

9. Polechonska L., Klink A. Trace metal bioindication and phytoremediation potentialities of *Phalaris arundinacea* L. (reed canary grass) // Journal of Geochemical Exploration. 2014. V. 146. P. 27–33. doi: 10.1016/j.gexplo.2014.07.012

10. Brezinova T., Vymazal J. Evaluation of heavy metals seasonal accumulation in *Phalaris arundinacea* in a constructed treatment wetland // Ecological Engineering. 2015. V. 79. P. 94–99. doi: 10.1016/j.ecoleng.2015.04.008

11. Rachkova N.G., Raskosha O.V. Consequences of uranium and radium-226 entering into the organisms of plants and animals in territory of radioactive wastes storage // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 3. P. 188–195 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-3-188-195

12. 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. doi: 10.1016/j.apradiso.2010.08.012

13. Antoniadis V., Shaheen S.M., Stark H.-J., Wernrich R., Levizou E., Merbach I., Rinklebe J. Phytoremediation potential of twelve wild plant species for toxic elements in a contaminated soil // Environment International. 2021. V. 146. Article No. 106233. doi: 10.1016/j.envint.2020.106233

14. Maximum permissible concentrations (MPC) of chemicals in the soil: Hygienic standards. Moskva: Federalnyy centr gigieny i epidemiologii Rospotrebnadzora, 2006. 15 p. (in Russian).

15. Hu N., Ding D., Li G., Zheng Ji., Li L., Zhao W., Wang Y. Vegetation composition and ²²⁶Ra uptake by native plant species at a uranium mill tailings impoundment in South China // Journal of Environmental Radioactivity. 2014. V. 129. P. 100–106. doi: 10.1016/j.jenvrad.2013.12.012

16. Ermakov V.V., Tyutikov S.F. Geochemical ecology of animals. Moskva: Nauka, 2008. 315 p (in Russian).

17. Palansooriyaa K.N., Shaheenb S.M., Chene S.S., Tsange D.C.W., Hashimoto Y., Houg D., Bolanh N.S., Rinklebe J., Oka Y.S. Soil amendments for immobilization of potentially toxic elements in contaminated soils: A critical review // Environment International. 2020. V. 134. Article No. 105046. doi: 10.1016/j.envint.2019.105046