

УДК 546.791:546.44

DOI 10.19110/1994-5655-2021-5-66-71

**Л.М. ШАПОШНИКОВА, Н.Г. РАЧКОВА,
О.В. РАСКОША**

АККУМУЛЯЦИЯ УРАНА И РАДИЯ-226 ДИКОРАСТУЩИМИ РАСТЕНИЯМИ И ИХ ФИТОРЕМЕДИАЦИОННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ

*Институт биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН,
г. Сыктывкар*

*shaposhnikova.l.m@ib.komisc.ru,
rachkova@ib.komisc.ru,
raskosha@ib.komisc.ru*

**L.M. SHAPOSHNIKOVA, N.G. RACHKOVA,
O.V. RASKOSHA**

URANIUM AND RADIUM ACCUMULATION BY WILD PLANTS AND THEIR PHYTOREMEDIATION POTENTIAL

*Institute of Biology, Federal Research Centre
Komi Science Centre, Ural Branch, RAS,
Syktivkar*

Аннотация

В статье представлены результаты по изучению аккумуляции урана и радия-226 канареечником тростниковидным (*Phalaris arundinacea* L.) и осокой острой (*Carex acuta* L.), подтвержден их потенциал для использования в качестве фитостабилизаторов радиоактивных загрязнений. Выявлено, что аккумуляция урана и радия-226 из загрязненной пойменной аллювиально-дерновой почвы в надземной части растений невысокая и не позволяет отнести их к видам-концентраторам исследуемых радионуклидов. В то же время установлено, что уран и радий-226 преимущественно аккумулируются в корневой системе растений, которая и служит барьером для перехода радионуклидов в их надземную биомассу.

Ключевые слова:

уран, радий-226, аккумуляция, миграция, фитостабилизация, канареечник тростниковидный, осока

Abstract

The paper presents the results of studying the accumulation of uranium and radium-226 in canary grass (*Phalaris arundinacea* L.) and sedge (*Carex acuta* L.) in order to identify their role in the biogeochemical cycles of radionuclides, as well as their phytoremediation potential for use in remediation of radioactive contaminated territories. The content of radionuclides in soils has increased as a result of the activity of radium production enterprise in 1930-1950. Uranium content in the studied soil samples varied within 0.83–1.65 µg / g dry weight. Activity concentrations of radium-226 were in the range 1.82–37.6 Bq / g dry weight. The investigated plants were dug up by the roots. The root part was washed from the soil and separated from the aboveground biomass. In both parts of the plants, concentrations of uranium and radium-226 were determined. Based on the obtained data, bioconcentration factors (BCF) of radionuclides in both parts of the plants relative to the soil were calculated. Transfer factor TF (root / aboveground part) was also calculated as the ratio of the radionuclide concentrations in the aboveground part of plants and their roots. It was revealed that the accumulation of uranium and radium-226 in the aboveground part of the plants is low, which does not allow us to classify these species as concentrators of the studied radionuclides. BCFs (aboveground parts / soil) for uranium were ranged in 0.02–0.04. In the case of radium-226, BCFs varied from 0.007 to 0.12. The main part of uranium and radium-226 was accumulated in the root system of plants, which served as a barrier for the transfer of radionuclides to their aboveground parts. TFs (aboveground part / root) was 0.17–0.37 for uranium and 0.08–0.29 for radium. The obtained results indicate that canary grass and sedge contribute

to the stabilization of uranium and radium in the studied soil and have the potential to be used as phyto-stabilizers for these contaminants.

Введение

Рост ядерной промышленности с каждым годом увеличивает техногенную нагрузку на природные экосистемы. Важное место среди проблем, связанных с загрязнением, занимает радиационная безопасность. Так, добыча урановых руд сопровождается большим выбросом пылеобразующих радиоактивных частиц, а при переработке этого сырья образуется значительное количество отходов с повышенным содержанием радионуклидов ряда распада урана и актиноурана. По прогнозам экспертов [1], объемы добычи природного урана в ближайшей перспективе увеличатся в два раза. Ожидается, что в будущем этот показатель будет только расти, принося в жизнь новые экологические проблемы, связанные с процессами концентрирования и рассеяния естественных радиоактивных элементов в природных объектах.

Двойную роль в биогеохимических миграционных циклах радионуклидов способны играть растения. Являясь одним из ключевых звеньев пищевых цепей, они способствуют поступлению радионуклидов в организмы животных и человека, что в конечном итоге приводит к проблемам токсикологического и радиологического характера [2]. В то же время, благодаря аккумулярующим функциям, растения приносят огромную пользу человечеству, выполняя важную роль в удалении загрязняющих веществ, в том числе радионуклидов, из окружающей среды и способствуя тем самым ее очищению. На этом их свойстве основаны фиторемедиационные технологии восстановления нарушенных территорий [3–6].

В Республике Коми имеются территории, подвергшиеся загрязнению природными радионуклидами более 60 лет назад вследствие добычи радия из пластовых вод [7], что привело к нарушению первоначального биогеоценоза. В процессе его восстановления формирование растительных сообществ происходило естественным образом. В настоящее время на этих загрязненных участках разнообразие сосудистых растений в своей географической и экологической структуре не отличается от фоновых территорий района, хотя на площадках с наибольшим уровнем радиационного и химического воздействия оно характеризуется все же меньшим богатством видов [8].

Цель работы – исследование аккумуляции урана и радия-226 некоторыми дикорастущими видами растений, произрастающими в условиях радиоактивного загрязнения. Изучение этих свойств растений может способствовать не только идентификации роли растительности в биогеохимических циклах радионуклидов и процессах самоочищения почв от поллютантов, но и выявлению видов, по-

Keywords:

uranium, radium-226, accumulation, migration, phytostabilization, canary grass, sedge

лезных для использования в фиторемедиационных мероприятиях.

Материалы и методы

Полевые наблюдения и отбор проб проводились в окрестностях пос. Водный Ухтинского района Республики Коми, где до 1947 г. действовало крупное предприятие по добыче радия из пластовых вод нефтяных месторождений, а позже, до 1957 г., – из отходов урановой промышленности [7]. Исследуемый участок площадью около 1 га является территорией бывшего химического завода, радиоактивное загрязнение которой произошло в результате сброса на поверхность почвы отработанных пластовых вод. В целом, участок характеризуется пойменной аллювиально-дерновой почвой, на которой произрастает луговая растительность. Однако примерно треть территории заболочена и занята осоковым сообществом растений. В 2018–2019 гг. здесь наряду с почвенным субстратом были отобраны образцы доминирующих видов многолетних растений канареечника тростниковидного (*Phalaris arundinacea* L.) и осоки острой (*Carex acuta* L.) для радиохимического определения содержания урана и радия-226 в их подземных (корни) и надземных частях. Для этого растения выкапывали вместе с корнями. Корневую часть отмывали от почвы и отделяли от надземной биомассы. На основе полученных данных о содержании урана и радия-226 в разных частях растений были вычислены коэффициенты накопления (КН) радионуклидов в них относительно почвы. Рассчитывали также коэффициент перехода КП (корень / надземная часть) как кратность концентрирования радионуклидов в надземной биомассе относительно корней растений.

Уран в растениях и почвах анализировали люминесцентным методом [9]. Чувствительность метода – 0.03 мкг/г при ошибке измерений $\pm 20\%$. Радий-226 определяли эманационным методом [10]. Чувствительность метода – 2.0×10^{-12} г/г, погрешность измерений – 15%. Все измерения осуществляли в трехкратных повторностях, расчеты были произведены на воздушно-сухое вещество. Статистическую обработку результатов проводили в программах Statistica 6.1 (StatSoft Inc.). Описательная статистика рассчитана при доверительном интервале 95%. Достоверность различий для выборок оценивали по U-критерию Манна-Уитни (U-test).

Результаты и обсуждение

Содержание урана в исследованных образцах почв варьировало в пределах 0.83–1.65 мкг/г (табл. 1), что до 1.5 раз превышало его концентрации, характерные для фоновых аллювиальных почв региона [11]. Доля радиоактивного элемента, переносимая в надземную часть растений, была относи-

Таблица 1

Показатели аккумуляции урана разными видами растений

Table 1

Indicators of uranium accumulation by different plant species

Содержание U в почве, мкг/г	Содержание U в растениях, мкг/г		Коэффициенты накопления (КН)		КП (Надземная часть / корневая часть)
	Корневая часть	Надземная часть	Корневая часть / почва	Надземная часть / почва	
<i>Канареечник тростниковидный</i>					
1.60±0.23	0.07±0.01	0.02±0.003	0.05±0.008	0.01±0.001	0.30±0.04
1.47±0.19	0.08±0.02	0.01±0.001	0.05±0.006	0.01±0.001	0.17±0.03
1.32±0.19	0.06±0.01	0.01±0.001	0.05±0.007	0.01±0.001	0.18±0.03
<i>Осока острая</i>					
1.33±0.18	0.09±0.01	0.03±0.002	0.07±0.01	0.02±0.03	0.32±0.03
0.83±0.12	0.08±0.01	0.03±0.002	0.10±0.02	0.04±0.006	0.37±0.05

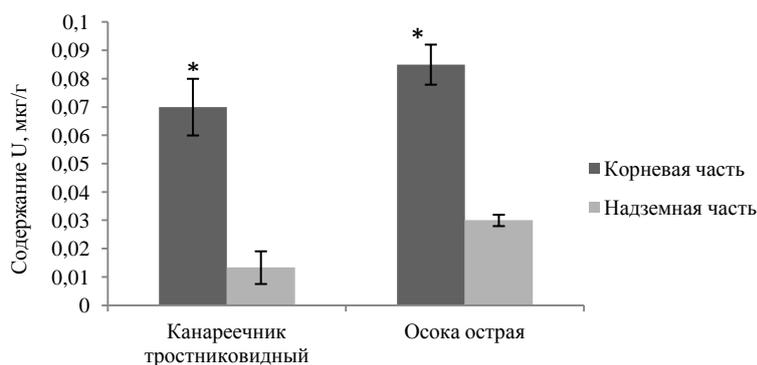


Рис. 1. Содержание урана в корневой и надземной частях растений. Примечание: * – различия содержаний урана в корневой и надземной частях растений достоверны при $p \leq 0.01$.

Fig. 1. The content of uranium in the root and aboveground parts of plants.

Note: * – differences in uranium content in the root and aboveground parts of plants are significant at $p \leq 0.01$.

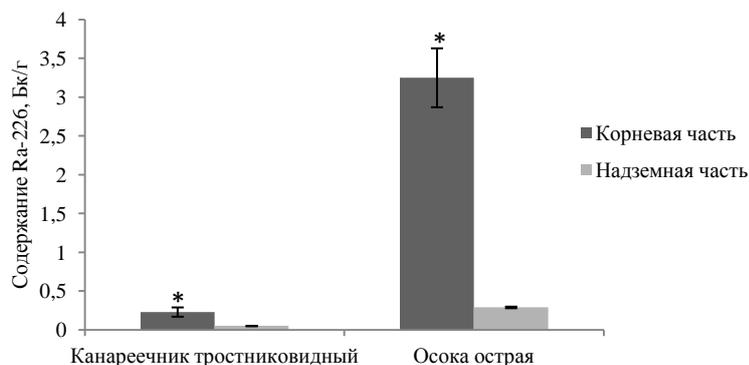


Рис. 2. Содержание радия-226 в корневой и надземной частях растений.

Примечание: * – различия содержаний радия-226 в корневой и надземной частях растений достоверны при $p \leq 0.01$.

Fig. 2. The content of radium-226 in the root and aboveground parts of plants.

Note: * – differences in radium-226 content in the root and aboveground parts of plants are significant at $p \leq 0.01$.

тельно невысокой и соответствовала КН (надземная часть / почва), изменяющимся в пределах 0.01–0.04.

Для всех исследованных образцов растений было характерно более высокое содержание U в их корневой части (рис. 1). Различия достоверны и в случае канареечника, и в случае осоки (U-test, $p \leq 0.01$). Коэффициенты перехода КП (корень / над-

земная часть) урана изменялись в пределах 0.17–0.37. Это свидетельствует о том, что основная доля урана, вовлекаемого в процесс биологического поглощения канареечником и осокой, накапливается в корневой части растений, и только до трети общего содержания радионуклида в исследуемых видах переходит в надземную биомассу.

Содержание радия-226 в исследуемых пробах почв варьировало от 1.82 до 37.6 Бк/г, что превышало соответствующий показатель для типичных аллювиальных пойменных почв [11]. Поступление радионуклида из этих образцов в надземную часть растений было сравнительно слабым. Так, КН в надземной части относительно почвы для канареечника составили 0.02–0.03, для осоки – 0.007 и 0.12. Значительная вариация КН в случае осоки связана с большим различием содержаний радия в исследуемых почвенных образцах. Как правило, мобильность и биологическая доступность радионуклида с ростом его концентрации в почве снижаются, что может отражаться на показателях его накопления растениями.

Подобно урану, содержания радия в корневой части растений были значительно выше (U-test, $p \leq 0.01$), чем в его надземной биомассе (рис. 2). Если в случае канареечника КП (надземная часть / корень) варьировали от 0.18 до 0.29, то в случае осоки их абсолютные значения оказались заметно меньше и изменялись от 0.08 до 0.10. При этом накопление радия в корнях растений относительно почвы было более высоким в сравнении с ураном. В случае осоки содержание радия в корневой части в одном из случаев достигало значений, соответствующих его содержанию в почве (табл. 2).

Таблица 2

Показатели аккумуляции радия-226 разными видами растений

Table 2

Indicators of radium-226 accumulation by different plant species

Содержание Ra-226 в почве, Бк/г	Содержание Ra-226 в растениях, Бк/г		Коэффициенты накопления (КН)		КП (надземная часть / корневая часть)
	Корневая часть	Надземная часть	Корневая часть / почва	Надземная часть / почва	
<i>Канареечник тростниковидный</i>					
2.20±0.27	0.22±0.03	0.05±0.003	0.10±0.03	0.02±0.002	0.23±0.03
1.96±0.21	0.28±0.04	0.05±0.004	0.14±0.03	0.03±0.004	0.18±0.2
1.82±0.19	0.17±0.01	0.05±0.003	0.10±0.02	0.03±0.004	0.29±0.03
<i>Осока острая</i>					
2.61±0.26	2.98±0.30	0.30±0.04	1.14±0.15	0.12±0.04	0.10±0.03
37.6±4.22	3.52±0.34	0.28±0.03	0.10±0.02	0.007±0.002	0.08±0.005

Известно, что по способности к накоплению радионуклидов, равно как и других химических элементов, различные виды растений сильно отличаются. Среди них специалисты обычно выделяют такие группы, как концентраторы металлов, индикаторы и эксклюдеры [12]. На свойстве растений накапливать металлы в высоких концентрациях в надземной части основана одна из методик фитодезактизации загрязненных территорий – фитоэкстракция [3]. Концентраторы (гиперконцентраторы) способны аккумулировать повышенные количества металлов в растительной ткани. В отношении урана таковым является подсолнечник (*Helianthus annuus*) [13, 14]. Известно, что хорошими аккумуляторами этого радиоактивного элемента являются наземные и водные мхи, лишайники [15, 16] и некоторые виды древесно-кустарниковой растительности. Во многом это связано с тем, что уран относится к элементам акропетального типа распределения, т.е. сравнительно более интенсивно накапливается в старых и многолетних органах и тканях растений [17]. Радий-226 также хорошо аккумулируется древесными и кустарниковыми видами растений, мхами, в меньшей степени – травами [18].

Согласно полученным данным, исследуемые нами виды растений нельзя считать концентраторами радионуклидов. Относительно низкие КН (надземная часть / почва), характеризующие канареечник тростниковидный и осоку острую, не позволяют их отнести к группе растительных организмов, способных выносить значительные количества урана и радия-226 на дневную поверхность. Как следствие, эти виды не представляются возможным использовать в качестве фитоэкстрагентов радионуклидов. Хотя перспективы использования канареечника в качестве фитоэкстрагента для некоторых микроэлементов, в основном за счет его большой биомассы, в литературе обсуждаются [19].

Наряду с концентраторами существует группа растений – фитостабилизаторов, в которых содержание металлов сравнительно ниже их содержания в среде произрастания. Несмотря на то, что эти растительные организмы обладают низким потенциалом извлечения металлов, они могут быть эффективны для целей стабилизации состояния металлов в почвах посредством сорбции корнями, осаждения, комплексобразования или снижения их валентности (подвижности) в ризосфере [3, 20]. Такие виды способны накапливать металлы из за-

грязненного субстрата корнями, но транспорт поллютантов и их проникновение в надземную биомассу ограничены [3]. Так, согласно А.Л. Ковалевскому [21], накопление урана на поверхности корневой обусловлено переходом в восстановительной среде растворимых соединений U(VI) в нерастворимое состояние соединений U(IV). Часть урана при этом выделяется в почве в прикорневой зоне соответствующих растений в виде вторичных минералов. В целом же, пониженная подвижность радиоактивного элемента в растительной ткани может быть связана с тем, что он имеет тенденцию сорбироваться на клеточных стенках, поэтому его концентрация в подземной части растения обычно выше [14].

Анализ данных литературы показывает, что канареечник тростниковидный является хорошим фитостабилизатором в отношении нескольких микроэлементов. Так, по мнению авторов [20], растение представляет интерес для фитостабилизации загрязнений, связанных с такими металлами, как Со и Сd. Доказано, что лишь небольшая часть микроэлементов, захваченных корнями канареечника, попадает в его стебли и листья. Во всех исследованных нами образцах канареечника и осоки корни также выступали барьером для перехода урана и радия в надземные части растений. Барьерная роль корневой системы в случае накопления радия в исследованных растениях проявилась значительно, чем для урана. Оба изучаемых вида, канареечник тростниковидный и осока острая, представляют собой крупные многолетние растения и имеют хорошую биомассу как в надземной, так и в корневой частях. Учитывая распространенность этих видов растений на исследуемом участке, можно утверждать, что они вносят заметный вклад в стабилизацию урана и радия в почве. Особенно это важно в случае осоки, которая произрастает в пойме на заболоченной части участка. Высокая степень накопления радионуклидов, в частности радия, в ее корневой системе будет способствовать не только снижению миграционной способности поллютантов, но и препятствовать рассеянию и выносу компонентов радиоактивного загрязнения в речную систему.

Заключение

Реабилитация территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению, является сложным и многозатратным процессом, тесно связанным с

проблемами перераспределения радионуклидов в биогеохимических циклах их миграции. Одним из направлений для снижения вероятности возникновения и уменьшения остроты подобных экологических проблем является стабилизация радиоэкологического состояния территорий посредством использования растений-фитостабилизаторов радионуклидов в почве. Результаты исследования аккумуляции урана и радия-226 канареечником тростниковидным и осокой показали слабое концентрирование радионуклидов в надземной части растений. В то же время накопление радиоактивных элементов в корневой системе растений, которая выступала барьером для перехода радионуклидов в их надземные части, было значительно выше. В целом, полученные результаты свидетельствуют о том, что канареечник и осока способствуют стабилизации урана и радия-226 в радиоактивно загрязненной пойменной аллювиально-луговой почве и, вследствие этого, перспективны для дальнейшего изучения с целью использования при реабилитации нарушенных территорий. Анализ результатов проведенного исследования в совокупности с данными литературы указывает на фиторемедиационный потенциал растений этих видов в отношении некоторых других токсичных микроэлементов, содержание которых в почве исследуемой загрязненной территории также повышено [7].

Исследования выполнены в рамках госзадания Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН № 0414-2018-0002 с частичной поддержкой гранта РФФИ и Правительства Республики Коми № 20-45-110009 p_a.

Литература

1. Назарова З.М., Овсейчук В.А., Лемент О.Ю. Рынок урана: современное состояние, проблемы и перспективы его развития // Проблемы современной экономики. 2016. № 2. С. 159–162.
2. Regulation of the Oxidative Processes in the Organs of Mice under the Effects of Chemical and Physical Factors at Low Doses / A.G. Kudyasheva, N.G. Zagorskaya, O.V. Raskosha, L.N. Shishkina // Biofizika. 2021. V. 66. № 4. P. 741–749.
3. Ali H., Khan E., Sajad M.A. Phytoremediation of heavy metals – concepts and applications // Chemosphere. 2013. V. 91. P. 869–881.
4. Evaluation of terrestrial plants extracts for uranium sorption and characterization of potent phytoconstituents / S. Sharma, B. Singh, S.K. Thulasidas, M.J. Kulkarni, V. Natarajan, V.K. Manchanda // International Journal of Phytoremediation. 2016. V. 18 (1). P. 10–15. DOI: 10.1080/15226514.2015.1045126
5. A review on in situ phytoremediation of mine tailings / L. Wang, B. Ji, Y. Hu, R. Liu, W. Sun // Chemosphere. 2017. V. 184. P. 594–600.
6. Pentyala V.-B., Eapen S. High efficiency phytoextraction of uranium using *Vetivazizanioides* L. Nash // International Journal of Phytoremediation. 2020. V. 22 (1). P. 1137–1146. DOI: 10.1080/15226514.2020.1741506
7. Евсеева Т.И., Таскаев А.И., Кичигин А.И. Водный промысел. Сыктывкар, 2000. 39 с.
8. Species diversity of plant communities from territories anthropogenically contaminated with natural radionuclides / E.S. Belykh, T.A. Maystrenko, B.I. Grusdev, O.M. Vakhrusheva, A.V. Kaneva, V.G. Zainullin, A.V. Trapeznikov // Russian Journal of Ecology. 2015. V. 46 (5). P. 425–430.
9. Добролюбовская Т.С. Люминесцентный метод. Аналитическая химия урана. М.: Наука, 1962. С. 143–165.
10. Старик И.Е. Основы радиохимии. Л.: Наука, 1969. 247 с.
11. Тяжелые естественные радионуклиды в биосфере: Миграция и биологическое действие на популяции и биогеоценозы / Под ред. Р.М. Алексахина. М.: Наука, 1990. 368 с.
12. Baker A.J.M. Accumulators and excluders: strategies in the response of plants to heavy metals // Journal of Plant Nutrition. 1981. V. 3. P. 643–654.
13. Removal of uranium from water using terrestrial plants / S. Dushenkov, D. Vasudev, Y. Kapulnik, D. Gleba, D. Fleisher, K.C. Ting, B. Ensley // Environment, Science and Technology. 1997. V. 31. P. 3468–3474.
14. Shahandeh H., Hossner L. Role of soil properties in phytoaccumulation of uranium // Water, Air and Soil Pollution. 2002. V. 141. P. 165–180.
15. Тумаева Н.А., Таскаев А.И. Миграция тяжелых естественных радионуклидов в условиях гумидной зоны. Л.: Наука, 1983. 232 с.
16. Uranium accumulation in aquatic macrophytes in an uraniumiferous region: Relevance to natural attenuation / C. Cordeiro, P. Favas, J. Pratas, S.K. Sarkar, P. Venkatachalam // Chemosphere. 2016. V. 156. P. 76–87.
17. Асварова Т.А. Содержание урана и тория в доминирующих видах растений Центрального Кавказа // Юг России: экология, развитие. 2008. № 2. С. 38–44.
18. Шапошникова Л.М. Основные факторы, влияющие на биологическое поглощение урана, радия и тория // Вестник ИБ Коми НЦ УрО РАН. 2017. № 3. С. 49–57.
19. 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.04.008>
20. 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.07.012>
21. Ковалевский А.Л. О физиологических барьерах поглощения у растений по отношению к большим концентрациям урана в питающей среде // Теоретические и практические аспекты действия малых доз ионизирующих

излучений: Матер. Всесоюзного симпозиума. Сыктывкар, 1973. С. 92–94.

References

1. *Nazarova Z.M., Ovseichuk V.A., Lementa O.Yu.* Rynok urana: sovremennoe sostoyanie, problemy i perspektivy ego razvitiya [Uranium market: current state, problems and prospects of its development] // *Problemy sovremennoj ekonomiki* [Problems of modern economy]. 2016. No. 2. P.159–162.
2. Regulation of the Oxidative Processes in the Organs of Mice under the Effects of Chemical and Physical Factors at Low Doses / *A.G. Kudyasheva, N.G. Zagorskaya, O.V. Raskosha, L.N. Shishkina* // *Biofizika*. 2021. Vol. 66. №. 4. P. 741–749.
3. *Ali H., Khan E., Sajad M.A.* Phytoremediation of heavy metals – concepts and applications // *Chemosphere*. 2013. Vol. 91. P. 869–881.
4. Evaluation of terrestrial plants extracts for uranium sorption and characterization of potent phytoconstituents / *S. Sharma, B. Singh, S.K. Thulasidas, M.J. Kulkarni, V. Natarajan, V.K. Manchanda* // *Int. J. of Phytoremediation*. 2016. Vol. 18 (1). P. 10–15. DOI: 10.1080/15226514.2015.1045126
5. A review on in situ phytoremediation of mine tailings / *L. Wang, B. Ji, Y. Hu, R. Liu, W. Sun* // *Chemosphere*. 2017. V. 184. P. 594–600.
6. *Pentyala V.-B., Eapen S.* High efficiency phytoextraction of uranium using *Vetiveria zizanioides* L. Nash // *Int. J. of Phytoremediation*. 2020. Vol. 22 (1). P. 1137–1146. DOI: 10.1080/15226514.2020.1741506
7. *Evseeva T.I., Taskaev A.I., Kichigin A.I.* Vodnyj promysel [Water fishing]. Syktyvkar, 2000. 39 p
8. Species diversity of plant communities from territories anthropogenically contaminated with natural radionuclides / *E.S. Belykh, T.A. Maystrenko, B.I. Grusdev, O.M. Vakhrusheva, A.V. Kaneva, V.G. Zainullin, A.V. Trapeznikov* // *Russian J. of Ecology*. 2015. Vol. 46 (5). P. 425–430.
9. *Dobrolyubskaya T.S.* Lyuminescentnyj metod. Analiticheskaya khimiya urana [Luminescent method. Analytical chemistry of uranium]. Moscow: Nauka, 1962. P. 143–165.
10. *Starik I.E.* Osnovy radiokhimii [Fundamentals of Radiochemistry]. Leningrad: Nauka, 1969. 247 p.
11. Tyazhelye estestvennye radionuklidy v biosfere: Migraciya i biologicheskoe dejstvie na populyacii i biogeocenozy [Heavy natural radionuclides in the biosphere: Migration and biological effect on populations and biogeoceneses] / Ed. R.M. Aleksakhin. Moscow: Nauka, 1990. 368 p.
12. *Baker A.J.M.* Accumulators and excluders: strategies in the response of plants to heavy metals // *J. of Plant Nutrition*. 1981. Vol. 3. P. 643–654.
13. Removal of uranium from water using terrestrial plants / *S. Dushenkov, D. Vasudev, Y. Kapulnik, D. Gleba, D. Fleisher, K.C. Ting, B. Ensley* // *Environment, Science and Technology*. 1997. Vol. 31. P. 3468–3474.
14. *Shahandeh H., Hossner L.* Role of soil properties in phytoaccumulation of uranium // *Water, Air and Soil Pollution*. 2002. Vol. 141. P. 165–180.
15. *Titaeva N.A., Taskaev A.I.* Migraciya tyazhelyh estestvennyh radionuklidov v usloviyah gumidnoj zony [Migration of heavy natural radionuclides in a humid zone]. Leningrad: Nauka, 1983. 232 p.
16. Uranium accumulation in aquatic macrophytes in an uranium region: Relevance to natural attenuation / *C. Cordeiro, P. Favas, J. Pratas, S.K. Sarkar, P. Venkatachalam* // *Chemosphere*. 2016. Vol. 156. P. 76–87.
17. *Asvarova T.A.* Soderzhanie urana i toriya v dominiruyushchih vidah rastenij Central'nogo Kavkaza [The content of uranium and thorium in the dominant plant species of the Central Caucasus] // *Yug Rossii: ekologiya, razvitie* [South of Russia: ecology, development]. 2008. №. 2. P. 38–44.
18. *Shaposhnikova L.M.* Osnovnye faktory, vliyayushchie na biologicheskoe pogloshchenie urana, radiya i toriya [Main factors affecting the biological absorption of uranium, radium and thorium] // *Bull. of the Inst. of Biology, Komi Sci. Centre, Ural Branch, RAS*. 2017. № 3. P. 49–57.
19. *Brezinova T., Vymazal J.* Evaluation of heavy metals seasonal accumulation in *Phalaris arundinacea* in a constructed treatment wetland // *Ecological Engineering*. 2015. Vol. 79. P. 94–99. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoeng.2015.04.008>
20. *Polechonska L., Klink A.* Trace metal bioindication and phytoremediation potentialities of *Phalaris arundinacea* L. (reed canary grass) // *J. of Geochemical Exploration*. 2014. Vol. 146. P. 27–33. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.07.012>
21. *Kovalevsky A.L.* O fiziologicheskikh bar'erah pogloshcheniya u rastenij po otnosheniyu k bol'shim koncentraciyam urana v pitayushchej srede [On physiological barriers of absorption in plants in relation to high concentrations of uranium in the nutrient medium] / *Teoreticheskie i prakticheskie aspekty dejstviya malyh doz ioniziruyushchih izluchenij* [Theoretical and practical aspects of the action of small doses of ionizing radiation]: Proc. of All-Union Symp. Syktyvkar, 1973. P. 92–94.

Статья поступила в редакцию 07.10.2021.