



Издатель

ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»
Российская Федерация, г.Петрозаводск, пр.Ленина,33

Научный электронный журнал

ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

<http://ecopri.ru>

№ 1 (43). Март, 2022

Главный редактор

А. В. Коросов

Редакционный совет

В. Н. Большаков
А. В. Воронин
Э. В. Ивантер
Н. Н. Немова
Г. С. Розенберг
А. Ф. Титов
Г. С. Антипина
В. В. Вапиров
А. М. Макаров

Редакционная коллегия

Т. О. Волкова
Е. П. Иешко
В. А. Илюха
Н. М. Калинкина
J. P. Kurhinen
А. Ю. Мейгал
J. B. Jakovlev
В. Krasnov
А. Gugotek
В. К. Шитиков
В. Н. Якимов

Службы поддержки

А. Г. Марахтанов
Е. В. Голубев
С. Л. Смирнова
Н. Д. Чернышева
М. Л. Киреева

ISSN 2304-6465

Адрес редакции

185910, Республика Карелия, г.Петрозаводск, пр. Ленина, 33. Каб. 453

E-mail: ecopri@psu.karelia.ru

<http://ecopri.ru>





УДК УДК 550.424

ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ УРАНОВОГО РЯДА В ЛИСТОВОМ ОПАДЕ ДЕРЕВЬЕВ СЕМЕЙСТВА ИВОВЫЕ

ШАПОШНИКОВА
Любовь Михайловна

кандидат биологических наук, Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук (ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН), lmn06@mail.ru

РАЧКОВА
Наталья Гелиевна

кандидат биологических наук, Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук (ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН), rachkova@ib.komisc.ru

ГЛЯД
Валентина Макаровна

Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук (ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН), glyad@ib.komisc.ru

МУЗАККА
Татьяна Николаевна

Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук (ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН), muzakka@ib.komisc.ru

ТАРАНКОВА
Елена Викторовна

Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук (ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН), tarankova@ib.komisc.ru

Ключевые слова:

уран
226Ra
210Pb
выщелачивание
листовой опад
ива
осина

Аннотация: С целью прогнозирования барьерных функций компонентов природных экосистем в миграции радионуклидов исследованы формы нахождения U, 226Ra и 210Pb в свежих листовых опадах ивы и осины, собранных на загрязненной вследствие добычи радия таежной территории. В ходе эксперимента указанные радионуклиды экстрагировали из образцов опавшей листвы последовательно дистиллированной водой (водорастворимые формы), 1M ацетатом аммония (pH 7) (обменные формы) и 0.1M раствором серной кислоты (кислоторастворимые формы). Установлено, что исследуемые радионуклиды существенно отличаются степенью экстракции из листового опада. После всех этапов экстрагирования в опаде сохранялось 64–84 % 226Ra и 85–88 % 210Pb от их исходного валового содержания. Среди подвижных форм нахождения радионуклидов для радия была наиболее характерна обменная (12–20 %), а для свинца – кислоторастворимая (8–9 %). Количество извлеченного из опада урана по сравнению с этим было выше. После всех этапов экстракции доля неэкстрагируемого урана составила 6–14 % и 20–23 % в случаях ивы и осины соответственно. Результаты эксперимента свидетельствуют, что при радиоактивном загрязнении территорий таежной зоны листовая опад исследованных представителей семейства ивовых является хорошим временным депозитарием 226Ra и 210Pb. В то же время для урана ожидается относительно быстрое возвращение из ивового и осинового опада в абиотические компоненты окружающей среды. Полученные результаты, принимая во внимание степень накопления исследованных радионуклидов в зеленой массе древесных растений, их широкую распространенность в тайге, а также возможность

ветрового рассеяния листового опада, дополняют данные, необходимые для прогнозирования миграции и концентрирования естественных радионуклидов уранового ряда в загрязненных таежных экосистемах.

© Петрозаводский государственный университет

Получена: 24 августа 2021

Подписана к печати: 15 апреля 2022

Введение

Опад является важным структурным компонентом лесных экосистем, участвующим в биологическом цикле химических элементов. Масса его в составе органического вещества, заключенного в биомассе сообществ, составляет 1.5–2 % (Родин, Базилевич, 1965; Боев и др., 2018). На листовых участках лесов средней тайги в Республике Коми насчитывается 1.3–2.8 т/га наземного древесного опада (Пристова и др., 2012), который более чем на 80 % представлен листьями (хвоей). По имеющимся данным (Пристова и др., 2012), потеря их массы в течение года может достигать 40 %.

Разлагаясь в почве, листовая опад участвует в формировании подстилки, обеспечивает питание растения и микроорганизмы, пополняет почвенный химический состав, запускает новый этап миграционного цикла химических элементов (Yue et al., 2019; Xie et al., 2022). Таким образом, в процессе их круговорота в природе зеленые части деревьев способны играть важную роль. С одной стороны, опавшая листва (Носкова, Шуктомова, 2010; Ермаков и др., 2015; Боев и др., 2018) содержит накопленные поллютанты и, таким образом, принимает участие в их временном или долговременном депонировании в экосистеме. С другой стороны, ветровой перенос опада деревьев, произрастающих в зонах с повышенным содержанием в почве тяжелых металлов и радионуклидов, может приводить к рассеянию элементов-загрязнителей (Scheid et al., 2009). Важным показателем, характеризующим скорости этих процессов, является содержание подвижных форм нахождения поллютантов в опавшей листве. Для их выделения из растительных образцов широко используются экстракционные методы (Броварова и др., 2004; Бондарева, Субботин, 2016; Пучкова и др., 2017; Bolsunovsky et al., 2005). Исходя из доли экстрагированной части поллютантов, можно оценить барьерную функцию опада на пути их миграции, а также установить интенсивность выщелачивания миграционно способных форм элементов-загрязнителей из растительной биомассы природными водами.

С этой целью мы проанализировали соотношение различных форм нахождения радионуклидов уранового ряда (U , ^{226}Ra , ^{210}Pb) в свежей опавшей листве деревьев семейства ивовых (*Salicaceae*), которые широко распространены в Северном полушарии и, в частности, являются одним из доминирующих видов древесных растений в таежной зоне, загрязненной вследствие добычи радия (Республика Коми).

Материалы

Исследования проводили в северо-таежной подзоне Республики Коми на локальных участках, загрязненных более 50 лет назад отходами добычи радия из пластовых вод (Taskaev et al., 2003). Свежий листовая опад осины (*Populus tremula* L.) и ивы (*Salix caprea*) отбирали с поверхности почвы в конце сентября 2016 г. после опадания основной массы листвы. Ива произрастала на загрязненном отработанными пластовыми водами участке пойменного типа с активным водообменом. Для сбора образцов опавшей листвы здесь была выбрана одна площадка с мощностью амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения (МАЭД) 1.20 ± 0.20 мкЗв/ч, учтенная нами как площадка № 1. В отличие от ивы, осина произрастала в лесной зоне, почвенный покров которой был загрязнен слоем твердых производственных отходов толщиной до 25 см. Уровень загрязнения этого участка был выше первого, здесь были выбраны две экспериментальные площадки с разной мощностью амбиентного эквивалента дозы – № 2 (2.10 ± 0.35 мкЗв/ч) и № 3 (8.90 ± 1.40 мкЗв/ч). Фоновая МАЭД для региона исследований, по данным Государственного доклада «О состоянии окружающей среды Республики Коми в 2016 году» (Государственный доклад..., 2017), составляла 0.04–0.21 мкЗв/ч, что находится в пределах колебаний естественного гамма-фона.

С каждой площадки были отобраны по 3–5 образцов листового опада и по 3 смешанных образца (метод конверта) из верхнего 0–20 см слоя почвы. Почвенные пробы сушили, просеивали через сито 1 мм. Для определения ^{226}Ra и урана почву предварительно озоляли при 700 °С. ^{210}Pb выделяли из воздушно-сухих образцов.

Методы

Из образцов свежесобранного листового опада методом экстракции были выделены подвижные формы урана, ^{226}Ra и ^{210}Pb , для чего сырую биомассу обрабатывали последовательно экстрагентами в соотношении 1:5. На первых двух этапах экстрагировали водорастворимую и обменную фракции, перемешивая биомассу при комнатной температуре в течение 1 часа сначала с дистиллированной водой, а затем с $1\text{M CH}_3\text{COONH}_4$ (рН 7). После этого проводили экстракцию $0.1\text{M H}_2\text{SO}_4$ в течение 20 минут также при перемешивании (кислоторастворимая фракция). Сохранившееся в образцах после всех этапов экстракции количество радионуклидов считали неэкстрагируемым и обозначали как «остаток». Доли (X) радионуклида, извлекаемого с помощью экстрагентов, вычисляли по формуле:

$X (\%) = (\text{Содержание радионуклида в экстракте} / \text{Содержание радионуклида в исходном образце}) \cdot 100$.

^{226}Ra в образцах определяли эманационным методом (Старик, 1969) на приборе «Альфа-1» с чувствительностью 0.07 Бк/г и ошибкой измерений ± 15 %. У вальный – фотOLUMИнесцентным методом на люминесцентном фотометре ЛЮФ-57 (Добролюбская, 1962) с чувствительностью 0.03 мкг/г. Ошибка измерений составила ± 20 %. Удельную активность ^{210}Pb определяли радиометрическим методом на установке малого фона УМФ-2000 с предварительной радиохимической подготовкой и электрохимическим осаждением на никелевых дисках (Адамова, Таскаев, 1980). Минимальная обнаруживаемая активность при измерении 1000 с составляет не более 0.1 Бк, предел допустимой относительной погрешности ± 15 %. Мощность амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения на участках измеряли с помощью дозиметра ДКГ-02У «Арбитр-М». Диапазон измерений прибора составляет $0.1\text{--}3 \cdot 10^6$ мкЗв/ч, погрешность измерений – 15 %.

Статистическую обработку результатов осуществляли в программах Statistica 6.1 (StatSoft Inc.). Все измерения проводили в трехкратных повторностях. Описательная статистика была рассчитана при доверительном интервале 95 %. Достоверность различий для выборок устанавливали по U -критерию Манна – Уитни (U -test). Долю аккумулярованных радионуклидов в листовом опаде относительно их содержания в

почве рассчитывали через коэффициент (K):

$K = \text{Содержание радионуклида в листовом опаде} / \text{Содержание радионуклида в почве}$.

Содержания радионуклидов в листовом опаде и почвах при расчете коэффициента (K) были представлены в одинаковых единицах измерения.

Результаты

Согласно полученным результатам (табл. 1), в почве площадки №3, которая характеризовалась самым высоким радиационным фоном, содержание ^{226}Ra и ^{210}Pb было наибольшим. Так, удельная активность радия более чем в 10 , а свинца – в 1.5 раза превышала их содержание в почве других участков наблюдений. Содержание урана в почве лесных площадок № 2 и 3 достоверно не различалось, однако оно до 20 раз превосходило его содержание в почве пойменной площадки № 1. В целом выявленные значения концентраций превышали показатели, характерные для фоновых почв региона. Так, согласно данным литературы, содержание ^{226}Ra в фоновых подзолистых почвах составляет не более 13 мБк/г (Безносиков и др., 2017), ^{210}Pb – $44\text{--}55$ Бк/кг (Евсеева и др., 2012), U – в среднем 0.42 мкг/г (Рачкова, Шуктомова, 2009).

Содержания радиоактивных элементов в листовых опадах не всегда соответствовали уровню радиоактивного загрязнения почв на площадках (табл. 1). В листьях осины, произраставшей на почве №3 с наибольшей удельной активностью ^{226}Ra , его содержание было максимальным. В ивовой листве с участка №1 обнаружено наименьшее количество радионуклида, хотя в почвах № 1 и 2 его удельная активность значимо не различалась. Содержания U и ^{210}Pb в листовом опаде осины с площадок №2 и 3 были сходными. По сравнению с ними в листовом опаде ивы урана содержалось меньше. Однако, учитывая его низкое содержание в почве участка наблюдения № 1, можно прогнозировать более высокую интенсивность накопления радионуклидов урана в ивовой листве, чем в осиновой, при прочих равных условиях.

Соотношения форм нахождения радионуклидов, характерные для листовых опадос осины и ивы, различаются, о чем свидетельствуют результаты последовательной экстракции элементов. Так, на долю (X) подвижных форм ^{226}Ra в целом приходилось 33.0 ± 2.45 % его общей активности в опавших листьях ивы и 26.0 ± 3.29 % – осины. Кроме

Таблица 1. Содержание радионуклидов уранового ряда в воздушно-сухих образцах почвы и листового опада ивы и осины из зоны влияния бывших химических заводов по добыче радия

Радионуклид	№ 1		№ 2		№ 3	
	почва	листовой опад ивы	почва	листовой опад осины	почва	листовой опад осины
^{226}Ra , Бк/г	2.52 ± 0.51	0.08±0.02	1.98 ± 0.35	0.51 ± 0.10	29.6 ± 5.64	0.89 ± 0.17
U, мкг/г	0.98 ± 0.19	0.15±0.04	23.3 ± 4.66	0.25 ± 0.04	16.3 ± 2.85	0.24 ± 0.03
^{210}Pb , Бк/г	2.63 ± 0.53	–	2.67 ± 0.44	0.04 ± 0.01	4.24 ± 0.71	0.05 ± 0.01

Примечание. Приведены средние данные и ошибка среднего, прочерк – нет данных.

того, наблюдалось сходство в распределении радионуклида по экстрактам для опадов обоих видов деревьев (рис. 1): максимум приходился на обменную фракцию – в среднем 12–20 % в зависимости от площадки сбора листвы, что достоверно превышало его содержание в других подвижных фракциях (*U*-test, $p \leq 0.05$). В водорастворимой и кислоторастворимой формах нахождения обнаруживалось меньшее количество радия – от 2 до 10 % радионуклида выщелачива-

лось водой, 1–11 % – 0.1М серной кислотой. В то же время значительная часть радия после всех этапов экстракции сохранялась как в ивовой, так и в осиновой опавшей листве, что позволяет выдвинуть предположение о депонировании радионуклида в этих компонентах природных экосистем. Для ивы неэкстрагируемая доля радия составила 66.9 ± 7.21 %, для осины – 64–84 % его удельной активности в листовом опаде деревьев.

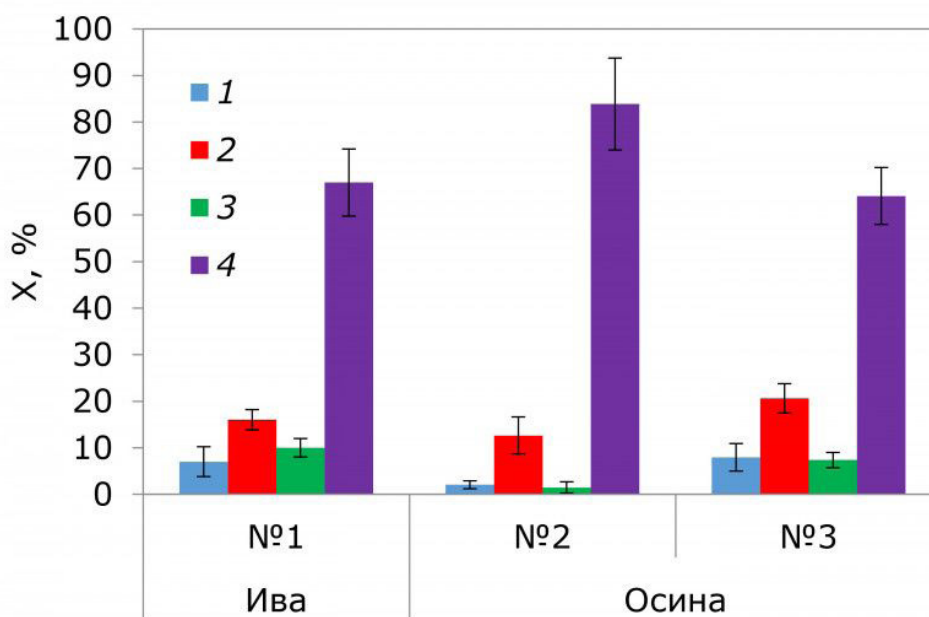


Рис. 1. Формы нахождения ^{226}Ra в листовом опаде ивы и осины: 1 – водорастворимая, 2 – обменная, 3 – кислоторастворимая, 4 – остаток

Fig. 1. Speciation of ^{226}Ra in leaf litter of willow and aspen: 1 – water-soluble, 2 – exchangeable, 3 – acid-soluble, 4 – non-extractable

По сравнению с ^{226}Ra неэкстрагируемая доля удельной активности ^{210}Pb в листовом опаде осины была выше и составила 85–88 % от его общей активности (рис. 2). Среди подвижных форм нахождения минимальные количества радионуклида обнаруживались во фракциях, экстрагируемых водой и 1М раствором ацетата аммония. Они составили 1–5 % и 1–3 % соответственно. Во фракции, экстрагируемой 0.1М раствором серной

кислоты, доля ^{210}Pb была достоверно выше – 8–9 % (*U*-test, $p \leq 0.05$). Эти данные указывают на то, что повышенная кислотность экстрагента приводит к увеличению полноты экстракции ^{210}Pb из образцов опавшей листвы. В природных условиях подобное выщелачивание может реализовываться в случае воздействия на листовую опад природных вод с низким водородным показателем.

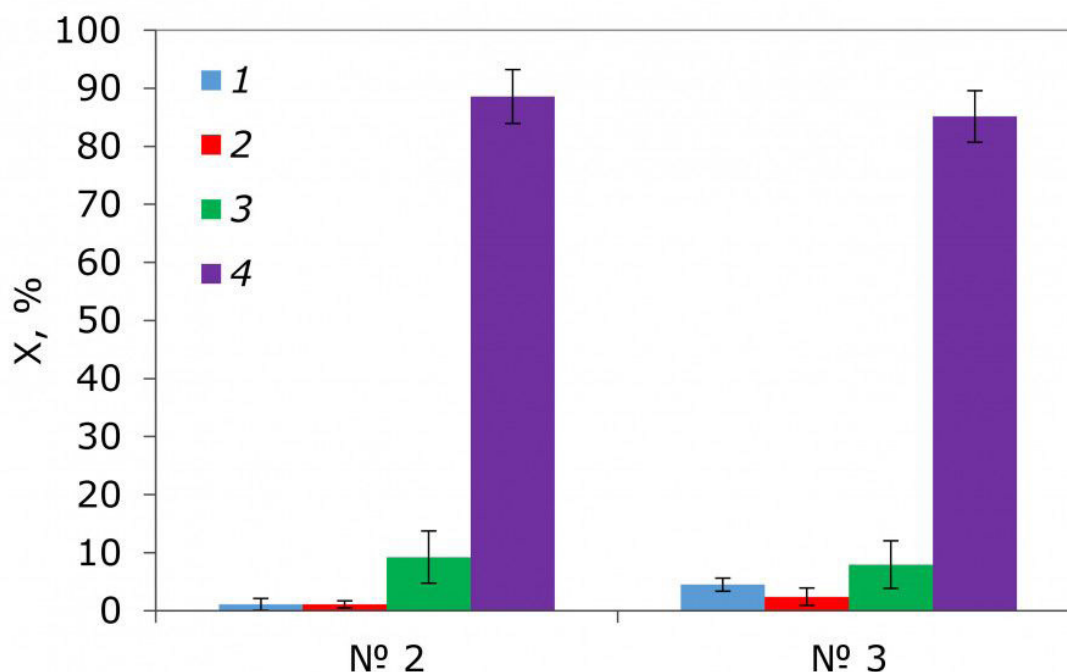


Рис. 2. Формы нахождения ^{210}Pb в листовом опаде осины: 1 – водорастворимая, 2 – обменная, 3 – кислоторастворимая, 4 – остаток

Fig. 2. Speciation of ^{210}Pb in leaf litter of willow and aspen: 1 – water-soluble, 2 – exchangeable, 3 – acid-soluble, 4 – non-extractable

По сравнению с другими радионуклидами относительная доля подвижных форм урана в листовых опадах была максимальной. Более половины его количества в исследуемом материале находилось в водорастворимой и обменной формах (рис. 3). Таким образом, радионуклид можно было экстрагировать нейтральными растворами. Содержание кислоторастворимых форм урана в опавшей листве было также больше в сравнении с ^{226}Ra и ^{210}Pb . В отношении прогнозных оценок интенсивности миграции урана в загрязненных экосистемах это предполагает его относительно легкое выщелачивание из листового опада под влиянием природных вод. Кислые и слабокислые природные воды будут усиливать процесс ремобилизации урана из опада. Доля неэкстрагируемого урана составила около 6–14 % в случае листьев ивы и 21–23 % – осины, что значительно меньше в сравнении с двумя другими радионуклидами.

Обсуждение

Целью нашего эксперимента было оценить роль листового опада в депонировании радионуклидов уранового ряда в экосистемах. Известно, что древесные и кустарниковые виды хорошо накапливают уран и радий (Титаева, Таскаев, 1983; Носкова, Шуктомова, 2010; Soudek et al., 2007). Степень нако-

пления радионуклидов может зависеть от разных факторов: уровня радиоактивного загрязнения, содержания биологически доступных форм радиоактивных элементов в почве, а также видоспецифичности растений (Шапошникова, 2017). Сопоставление полученных данных о содержании радионуклидов в свежем листовом опаде и почве площадок, на которой произрастали деревья, показывает, что листва может накапливать существенные количества радиоактивных элементов. Коэффициенты (K), связывающие содержания радионуклидов в свежем листовом опаде и почве, для ^{226}Ra были наиболее высокими и варьировали в пределах 0.03–0.25, для урана они составили 0.01–0.15 (рис. 4). Минимальные K наблюдались для ^{210}Pb – 0.01–0.02. Его наличие в опавшей листве помимо корневого пути может быть также обусловлено аэральным поступлением на листовую поверхность живых растений и опада, а именно осаждением частиц, содержащих ^{210}Pb , образованный в атмосфере в результате радиоактивного распада газа ^{222}Rn (Persson, Holm, 2011). Связывающие содержания радионуклидов в свежем листовом опаде и почве, для радия-226 были наиболее высокими и варьировали в пределах 0.03–0.25, для урана они составили 0.01–0.15 (рис. 4). Минимальные K наблюдались для свинца-210 – 0.01–0.02. Его наличие в

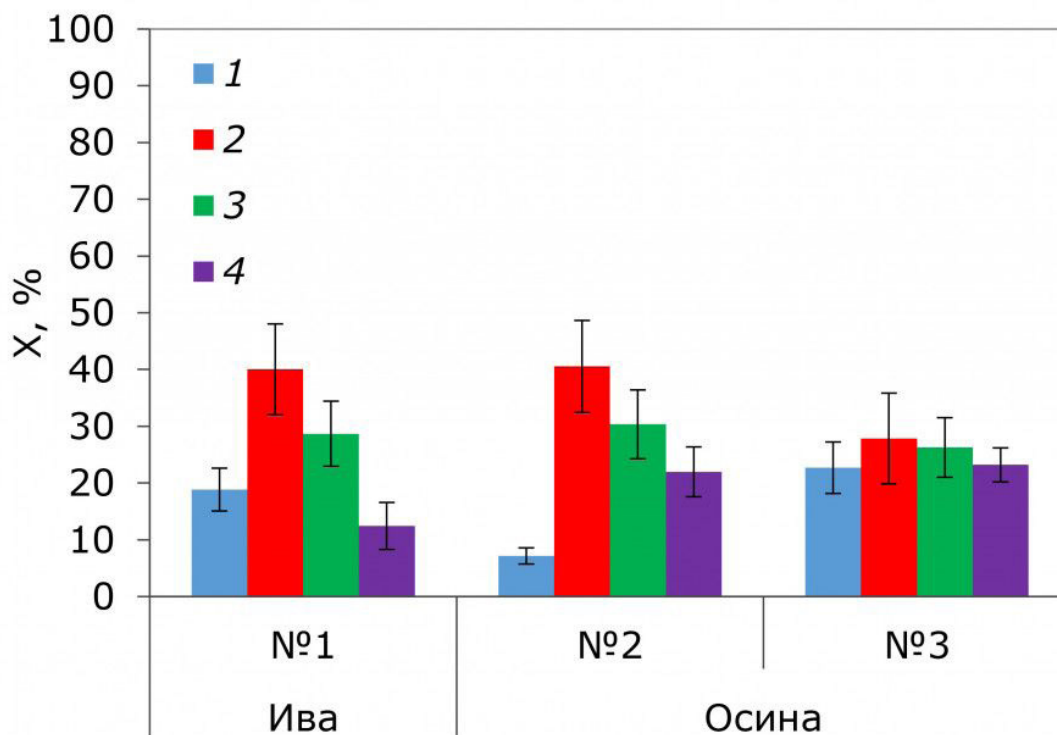


Рис. 3. Формы нахождения U в листовом опаде ивы и осины: 1 – водорастворимая, 2 – обменная, 3 – кислоторастворимая, 4 – остаток

Fig. 3. Speciation of Uranium in leaf litter of willow and aspen: 1 – water-soluble, 2 – exchangeable, 3 – acid-soluble, 4 – non-extractable

опавшей листве помимо корневого пути может быть также обусловлено аэральным поступлением на листовую поверхность живых растений и опада, а именно осаждением частиц, содержащих свинец-210, образованный в атмосфере в результате радиоактивного распада газа радона-222 (Persson, Holm, 2011).

Таким образом, в природных условиях листовой опад способен выступать своего рода депозитарием для радионуклидов уранового ряда. Однако время их сохранения в нем может зависеть от нескольких факторов. К их числу относятся прежде всего кислотность природных вод, скорость разложения опавшей листвы и, как следствие, динамика изменения форм нахождения радионуклидов в ней. По соотношению последних можно прогнозировать время выщелачивания радионуклидов из исследуемого материала под воздействием природных вод различного состава. Анализ литературных данных свидетельствует, что интенсивность экстракции радионуклидов из биомассы в подобных ситуациях может быть весьма значительной. Так, на примере выщелачивания стабильного свинца из биомассы мхов было показано (Onianwa et al., 1986), что при действии разбавленного раствора кислоты (0.1M HNO₃) в экстракт вытесняется 40–75 % химическо-

го элемента при относительно низкой доле водорастворимых форм. Авторы (Onianwa et al., 1986) справедливо полагают, что с прогностической точки зрения эти сведения особенно важны для районов, где высока вероятность выпадения кислотных дождей, пониженный pH которых будет способствовать выщелачиванию из мохового покрова многих поллютантов. В случае проведенного нами эксперимента для содержащегося в листовом опаде ²¹⁰Pb эта тенденция также находит подтверждение, хотя сам результат экстрагирования поллютанта не так внушителен, как установленный в вышеупомянутой публикации.

По итогам проведенных экспериментов можно сформулировать три тезиса: во-первых, исследованные радионуклиды способны депонироваться в листовом опаде, во-вторых, подвижность закрепленных в нем радионуклидов отличается по преобладающим формам нахождения, в-третьих, каждый радионуклид характеризуется специфичностью не только экстрагирования из исследованного материала в жидкие фазы, но и депонирования в нем. В частности, наблюдается характерное сходство в распределении ²²⁶Ra по экстрактам для опадов обоих видов деревьев, проявляющееся в преобладании среди выделенных подвиж-

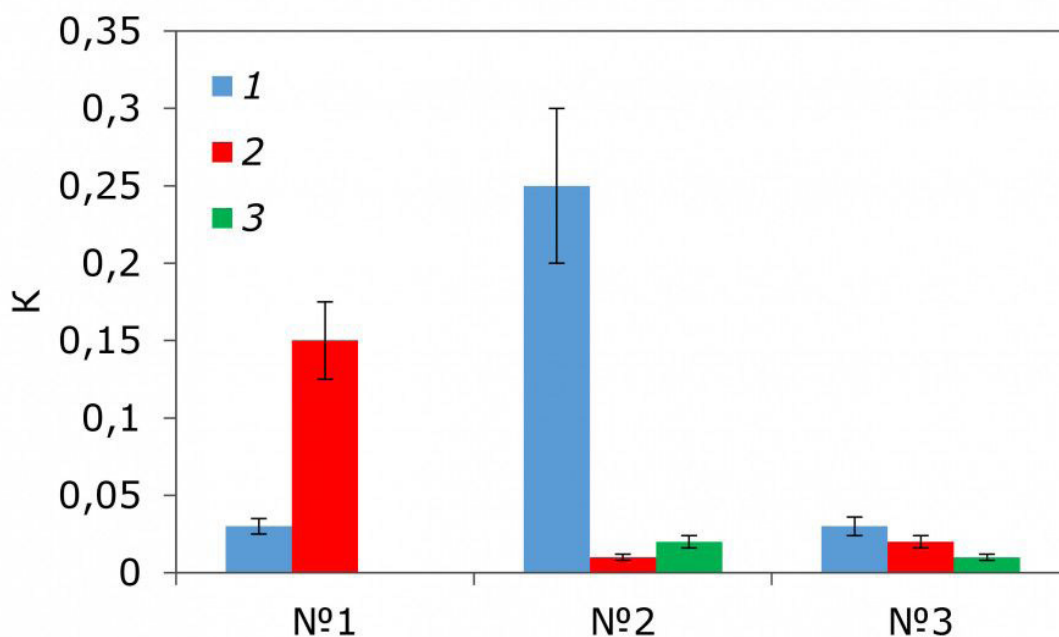


Рис. 4. Отношение (K) содержаний радионуклидов в листовом опаде и почве разных площадок: 1 – радий-226, 2 – уран, 3 – свинец-210

Fig. 4. The ratio (K) of the content of radionuclides in leaf litter and soil of different plots: 1 – radium-226, 2 – uranium, 3 – lead-210

ных форм радионуклида обменной фракции и значительной доли неэкстрагируемого «остатка». Такое распределение по формам нахождения не противоречит основным химическим свойствам радия. Известно, что для него как для элемента щелочноземельной группы свойственны реакции не только соосаждения, но и ионного обмена. К примеру, согласно имеющимся данным (Рачкова, Шапошникова, 2020), в почвах района исследований подвижность радия также обусловлена относительно высокой долей его ионообменных форм. Их существенная доля в удельной активности листового опада выявляет специфичную для радия склонность к обменным реакциям в природной среде. В целом ^{226}Ra и ^{210}Pb были устойчивыми к выщелачиванию дистиллированной водой, 1M $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ и 0.1M H_2SO_4 . Доля этих радионуклидов, сохранившаяся в опаде после всех этапов экстракции, наиболее существенна. Наименее стойким к действию вышеприведенных экстрагентов был содержащийся в листьях ивовых уран. Таким образом, опавшая листва является временным резервуаром для запасов первых двух радионуклидов, в то же время для урана стоит ожидать относительно быстрое возвращение обратно в окружающую среду в результате выщелачивания из опада природными водами. Их повышенная кислотность и существенная скорость разложения исследуемого мате-

риала в течение года, вероятно, будут усиливать этот процесс. В частности, известно, что потеря массы листового опада древесных растений является относительно высокой по сравнению с таковой для биомассы мхов (Lang et al., 2009), также отличающихся значительным поглощением исследуемых радионуклидов (Шапошникова, 2017). Это предполагает и сравнительно более быстрое возвращение радионуклидов из разрушающейся опавшей листвы в абиотические компоненты окружающей среды.

Анализ данных литературы дает также основание прогнозировать, что не исключено вторичное пополнение запаса радионуклидов в листовом опаде древесных растений вследствие его контакта с влажной загрязненной почвой, а в случае ^{210}Pb дополнительно за счет аэральных выпадений. Так, имеются данные о хороших сорбционных свойствах листьев и листового опада древесных в отношении тяжелых металлов, а также рекомендации к их использованию в качестве сорбентов (Alekseeva et al., 2016). Вероятно, именно вторичной сорбцией объясняется то, что содержание тяжелых металлов, в том числе стабильного свинца, в помещенных на загрязненную почву листьях со временем увеличивается. Это явление исследовано в публикации S. Scheid с соавторами (Scheid et al., 2009). Этими же авторами в результате двухлетнего эксперимента пока-

зано, что растворимость тяжелых металлов, содержащихся в листовом опаде, со временем снижается. В то же время отмечается, что мобильные формы поллютантов прочно связываются в подстилке уже после двух лет разложения опада. Для того чтобы доказать протекание этих процессов в отношении радионуклидов уранового ряда, необходимо изучить динамику их форм нахождения в процессе разложения листового опада.

Заключение

Выщелачивание из листового опада радионуклидов уранового ряда является важным процессом, влияющим на скорость их миграции в окружающей среде. На примере листового опада ивовых деревьев, произрастающих в загрязненной вследствие добычи радия таежной зоне, мы показали, что тяжелые естественные радионуклиды могут находиться в нем в различных формах – как

подвижных, так и маломобильных трудно-экстрагируемых. Так, для ^{226}Ra характерно нахождение в ионообменной форме, растворимость ^{210}Pb более всего связана с кислотностью экстрагента. В то же время оба эти радионуклида являются относительно устойчивыми к выщелачиванию, в отличие от урана, который легко вымывается из опада при действии используемых экстрагентов. Полученные результаты, принимая во внимание высокую степень накопления радионуклидов древесными видами, формы их нахождения в листовом опаде, а также возможность его ветрового рассеяния в окружающей среде, могут быть полезными в исследованиях миграции радиоактивных элементов, т. к. содержат новую информацию, необходимую для объективной оценки радиационной опасности загрязненных территорий.

Библиография

- Адамова Л. И., Таскаев А. И. Количественное определение ^{210}Po и ^{210}Pb в пробах почв и растительности // Миграция и биологическое действие естественных радионуклидов в условиях северных биогеоценозов. Сыктывкар, 1980. С. 64–71.
- Безносиков В. А., Лодыгин Е. Д., Шуктомова И. И. Искусственные и естественные радионуклиды в почвах южно- и среднетаежных подзон Республики Коми // Почвоведение. 2017. № 7. С. 824–829. DOI: 10.7868/S0032180X17050033
- Боев В. А., Барановская Н. В., Боев В. В. Ртуть в листовом опаде подтаежных лесов на фоновой территории // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329, № 8. С. 124–131.
- Бондарева Л. Г., Субботин М. А. Процессы ассимиляции трития водными растениями *Eloidea canadensis* и *Lemna minor* // Радиационная биология. Радиозэкология. 2016. Т. 56, № 4. С. 440–446. DOI: 10.7868/S0869803116040032
- Броварова О. В., Кочева Л. С., Карманов А. П., Шуктомова И. И., Рачкова Н. Г. Исследование физико-химических свойств сорбентов на основе растительного сырья // Известия высших учебных заведений «Лесной журнал». 2004. № 4. С. 112–121.
- Государственный доклад «О состоянии окружающей среды Республики Коми в 2016 году» / Министерство промышленности, природных ресурсов, энергетики и транспорта Республики Коми; ГБУ РК «ТФИ РК». Сыктывкар, 2017. 179 с.
- Добролюбовская Т. С. Люминесцентный метод. // Аналитическая химия урана. М.: Наука, 1962. С. 143–165.
- Евсеева Т. И., Белых Е. С., Майстренко Т. А., Гераськин С. А., Таскаев А. И., Вахрушева О. М. Латеральное распределение радионуклидов уранового и ториевого рядов в антропогенно-измененных почвах на территории складирования отходов радиевого производства // Радиационная биология. Радиозэкология. 2012. Т. 52, № 1. С. 103–112.
- Ермаков В. В., Петрунина Н. С., Тютиков С. Ф., Данилова В. Н., Хушвахтова С. Д., Дегтярев А. П., Кречетова Е. В. Концентрирование металлов растениями рода *Salix* и их значение при выявлении кадмиевых аномалий // Геохимия. 2015. № 11. С. 978–990. DOI: 10.7868/S0016752515110023
- Носкова Л. М., Шуктомова И. И. Сравнительная оценка поглощения ^{238}U и ^{226}Ra травянистой и древесной растительностью в условиях техногенного загрязнения // Радиационная биология. Радиозэкология. 2010. Т. 50, № 6. С. 642–648.
- Пристова Т. А., Хабибуллина Ф. М., Виноградова Ю. А. Роль микромицетов в формировании лесной подстилки лиственных насаждений средней тайги // Лесоведение. 2012. № 4. С. 47–55.
- Пучкова Е. В., Еремин В. В., Богданова О. Г., Гимельбрант Д. Е., Степанчикова И. С. Распределение полония-210 в талломах лишайников // Радиохимия. 2017. Т. 59, № 2. С. 189–192.
- Рачкова Н. Г., Шапошникова Л. М. Формы нахождения радия-226 в компонентах наземных и водных северотаежных экосистем в районе расположения бывшего радиевого промысла // Геохи-

- мия. 2020. Т. 65, № 6. С. 599–608. DOI: 10.31857/S0016752520050106
- Рачкова Н. Г., Шуктомова И. И. Изменение подвижности соединений урана, радия и тория в пахотном слое подзолистой почвы // Почвоведение. 2009. № 2. С. 211–217.
- Родин Л. Е., Базилевич Н. И. Динамика органического вещества и биологический круговорот зольных элементов и азота в основных типах растительности земного шара. М.; Л.: Наука, 1965. 256 с.
- Старик И. Е. Основы радиохимии. Л.: Наука, 1969. 247 с.
- Титаева Н. А., Таскаев А. И. Миграция тяжелых естественных радионуклидов в условиях гумидной зоны / Отв. ред. В. И. Павлоцкая. Л.: Наука, 1983. 232 с.
- Шапошникова Л. М. Основные факторы, влияющие на поглощение урана, радия и тория растениями // Вестник ИБ Коми НЦ УрО РАН. 2017. № 3. С. 49–57.
- Alekseeva A. A., Fazullin D. D., Kharlyamov D. A., Mavrin G. V., Stepanova S. V., Shaikhiev I. G., Shaimardanova A. S. The use of leaves of different tree species as a sorption material for extraction of heavy metal ions from aqueous media // International journal of Pharmacy and Technology. 2016. Vol. 8, № 2. P. 14375–14391.
- Bolsunovsky A., Zotina T., Bondareva L. Accumulation and release of Am by a macrophyte of the Yenisei River (*Elodea canadensis*) // Journal of the Environmental Radioactivity. 2005. Vol. 81. P. 33–46. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2004.10.012
- Lang S. I., Cornelissen J. H. C., Klahn T., van Logtestijn R. S. P., Broekman R., Schweikert W., Aerts R. An experimental comparison of chemical traits and litter decomposition rates in a diverse range of subarctic bryophyte, lichen and vascular plant species // Journal of Ecology. 2009. Vol. 97. P. 886–900. DOI: 10.1111/j.1365-2745.2009.01538.x
- Onianwa P. C., Ajayi S. O., Osibanjo O., Egunyomi A. Sorption and retention of Pb, Cu and Cd ions in three species of mosses used for air pollution studies in Nigeria // Environmental Pollution (Series B). 1986. Vol. 11. P. 231–238.
- Persson B. R. R., Holm E. Polonium-210 and lead-210 in the terrestrial environment: a historical review // Journal of Environment Radioactivity. 2011. Vol. 102. P. 420–429. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2011.01.005
- Scheid S., Günthardt-Goerg M. S., Schulin R., Nowack B. Accumulation and solubility of metals during leaf litter decomposition in non-polluted and polluted soil // European Journal of Soil Science. 2009. Vol. 60. P. 613–621. DOI: 10.1111/j.1365-2389.2009.01153.x
- Soudek P., Petrová S., Benešová D., Tykva R., Vankova R., Vanek T. Comparison of ²²⁶Ra nuclide from soil by three woody species *Betula pendula*, *Sambucus nigra* and *Alnus glutinosa* during the vegetation period // Journal of Environmental Radioactivity. 2007. Vol. 97. P. 76–82. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2007.03.008
- Taskaev A. I., Landa E. R., Guryev D. V., Golovko-Butler N., Kraemer T. F. Vodnyi: a long-term, low-level radiation exposure field site in Russia // Japanese Journal of Health Physics. 2003. Vol. 38. С. 332–343. DOI: 10.5453/jhps.38.332
- Xie Ya., Cao Ya., Xie Yo. Global-scale latitudinal patterns of twelve mineral elements in leaf litter // Catena. 2022. Vol. 208. P. 105743. DOI: 10.1016/j.catena.2021.105743
- Yue K., Yang W., Tan B., Peng Ya., Huang C., Hu Z., Ni X., Yang Yu., Zhou W., Zhang L., Wu F. Immobilization of heavy metals during aquatic and terrestrial litter decomposition in an alpine forest // Chemosphere. 2019. Vol. 216. P. 419–427. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.10.169

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке госбюджетной темы отдела Радиоэкологии Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН: «Действие ионизирующего излучения и факторов нерадиационной природы на биологические объекты и биогенная миграция тяжелых естественных радионуклидов» № 1021051101422-0-1.6.23 при частичной поддержке проекта РФФИ и Правительства Республики Коми № 20- 45-110009 p_a.

SPECIATION OF URANIUM-SERIES RADIONUCLIDES IN THE LEAF LITTER OF WILLOW FAMILY TREES

SHAPOSHNIKOVA Lyubov Mikhailovna *PhD, Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IB FRC Komi SC UB RAS), lmn06@mail.ru*

RACHKOVA Natalya Gelievna *PhD, Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IB FRC Komi SC UB RAS), rachkova@ib.komisc.ru*

GLYAD Valentina Makarovna *Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IB FRC Komi SC UB RAS), glyad@ib.komisc.ru*

MUZAKKA Tatyana Nikolaevna *Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IB FRC Komi SC UB RAS), muzakka@ib.komisc.ru*

TARANKOVA Elena Viktorovna *Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IB FRC Komi SC UB RAS), tarankova@ib.komisc.ru*

Keywords:

uranium
226Ra
210Pb
leaching
leaf litter
willow
aspen

Summary: In order to predict the barrier functions of the components of natural ecosystems in the migration of radionuclides, we studied the forms of U, 226Ra and 210Pb in fresh willow and aspen leaf litter collected in the taiga territory polluted by radium mining. In the course of the experiment, these radionuclides were sequentially extracted from fallen foliage with distilled water (water-soluble forms), 1M ammonium acetate (exchange forms), and 0.1M sulfuric acid solution (acid-soluble forms). Studied radionuclides differed in the degree of extraction from leaf biomass. After all the stages of extraction, 64–84 % of 226Ra and 85–88 % of 210Pb of their initial gross content were preserved in the litter. Among the mobile forms of radionuclides, exchange form (12–20 %) was the most characteristic for radium, and acid-soluble one (8–9 %) for lead. The amount of uranium extracted from leaf litter was higher in comparison with this. After all the extraction stages, the proportion of non-extractable uranium was 6–14 % and 20–23 % in the cases of willow and aspen, respectively. The results of the experiment indicate that in case of radioactive contamination of the taiga zone, the leaf litter of the studied representatives of the willow family is a good temporary depository of 226Ra and 210Pb. At the same time, uranium is expected to return quickly from the willow and aspen leaf litter to the abiotic components of the environment. Taking into account the degree of accumulation of the studied radionuclides in the green mass of woody plants, their widespread prevalence in the taiga, as well as the possibility of wind scattering of leaf litter, the obtained results complement the data necessary to predict the migration and concentration of natural uranium-series radionuclides in polluted taiga ecosystems.

Received on: 24 August 2021

Published on: 15 April 2022

References

- Adamova L. I., Taskaev A. I. Quantification of 210Po and 210Pb in soil and vegetation samples, Migraciya i biologicheskoe deystvie estestvennyh radionuklidov v usloviyah severnyh biogeocenzov. Syktyvkar, 1980. P. 64–71.
- Alekseeva A. A., Fazullin D. D., Kharlyamov D. A., Mavrin G. V., Stepanova S. V., Shaikhiev I. G., Shaimardanova A. S. The use of leaves of different tree species as a sorption material for extraction of heavy metal

- ions from aqueous media, *International journal of Pharmacy and Technology*. 2016. Vol. 8, No. 2. P. 14375–14391.
- Beznosikov V. A. Lodygin E. D. Shuktomova I. I. Artificial and natural radionuclides in soils of the Southern and Middle Taiga subzones of the Komi Republic, *Pochvovedenie*. 2017. No. 7. P. 824–829. DOI: 10.7868/S0032180X17050033
- Boev V. A. Baranovskaya N. V. Boev V. V. Mercury in leaf litter of subtaiga forests on the natural territory, *Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*. 2018. T. 329, No. 8. P. 124–131.
- Bolsunovsky A., Zotina T., Bondareva L. Accumulation and release of Am by a macrophyte of the Yenisei River (*Elodea canadensis*), *Journal of the Environmental Radioactivity*. 2005. Vol. 81. P. 33–46. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2004.10.012
- Bondareva L. G. Subbotin M. A. Interaction of Tritium with *Elodea canadensis* and *Lemna minor*, *Radiacionnaya biologiya. Radioekologiya*. 2016. T. 56, No. 4. P. 440–446. DOI: 10.7868/S0869803116040032
- Brovarova O. V. Kocheva L. S. Karmanov A. P. Shuktomova I. I. Rachkova N. G. Investigation of physicochemical properties of sorbents based on vegetable raw material, *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedeniy «Lesnoy zhurnal»*. 2004. No. 4. P. 112–121.
- Dobrolyubskaya T. S. Luminescent method., *Analiticheskaya himiya urana*. M.: Nauka, 1962. P. 143–165.
- Ermakov V. V. Petrunina N. S. Tyutikov S. F. Danilova V. N. Hushvahtova S. D. Degtyarev A. P. Krechetova E. V. Concentration of metals by plants of the genus *Salix* and their importance for identification of Cd anomalies, *Geohimiya*. 2015. No. 11. P. 978–990. DOI: 10.7868/S0016752515110023
- Evseeva T. I. Belyh E. S. Maystrenko T. A. Geras'kin S. A. Taskaev A. I. Vahrusheva O. M. Regularities of lateral distribution of uranium and thorium decay series radionuclides in the anthropogenically changed soils from the area of radium production waste storage, *Radiacionnaya biologiya. Radioekologiya*. 2012. T. 52, No. 1. P. 103–112.
- Lang S. I., Cornelissen J. H. C., Klahn T., van Logtestijn R. S. P., Broekman R., Schweikert W., Aerts R. An experimental comparison of chemical traits and litter decomposition rates in a diverse range of subarctic bryophyte, lichen and vascular plant species, *Journal of Ecology*. 2009. Vol. 97. P. 886–900. DOI: 10.1111/j.1365-2745.2009.01538.x
- Noskova L. M. Shuktomova I. I. Comparative evaluation of ²³⁸U and ²²⁶Ra absorption by herbaceous and woody species under man-made pollution, *Radiacionnaya biologiya. Radioekologiya*. 2010. T. 50, No. 6. P. 642–648.
- Onianwa P. C., Ajayi S. O., Osibanjo O., Egunyomi A. Sorption and retention of Pb, Cu and Cd ions in three species of mosses used for air pollution studies in Nigeria, *Environmental Pollution (Series B)*. 1986. Vol. 11. P. 231–238.
- Persson B. R. R., Holm E. Polonium-210 and lead-210 in the terrestrial environment: a historical review, *Journal of Environment Radioactivity*. 2011. Vol. 102. P. 420–429. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2011.01.005
- Pristova T. A. Habibullina F. M. Vinogradova Yu. A. The role of micromycetes in forest litter formation in deciduous stands of the Middle Taiga, *Lesovedenie*. 2012. No. 4. P. 47–55.
- Puchkova E. V. Eremin V. V. Bogdanova O. G. Gimel'brant D. E. Ctepanchikova I. S. Distribution of ²¹⁰Po in lichen thalli, *Radiohimiya*. 2017. T. 59, No. 2. P. 189–192.
- Rachkova N. G. Shaposhnikova L. M. Speciation of radium-226 in the components of terrestrial and aqueous Northern Taiga ecosystems in a former radium production site, *Geohimiya*. 2020. T. 65, No. 6. P. 599–608. DOI: 10.31857/S0016752520050106
- Rachkova N. G. Shuktomova I. I. Changes in the mobility of uranium, radium, and thorium in the plow layer of podzolic soil, *Pochvovedenie*. 2009. No. 2. P. 211–217.
- Rodin L. E. Bazilevich N. I. Dynamics of organic matter and biological circulation of ash elements and nitrogen in the main types of vegetation of the globe. M.; L.: Nauka, 1965. 256 p.
- Scheid S., Günthardt-Goerg M. S., Schulin R., Nowack B. Accumulation and solubility of metals during leaf litter decomposition in non-polluted and polluted soil, *European Journal of Soil Science*. 2009. Vol. 60. P. 613–621. DOI: 10.1111/j.1365-2389.2009.01153.x
- Shaposhnikova L. M. Main factors affecting accumulation of uranium, radium and thorium by plants, *Vestnik IB Komi NC UrO RAN*. 2017. No. 3. P. 49–57.
- Soudek P., Petrová S., Benešová D., Tykva R., Vankova R., Vanek T. Comparison of ²²⁶Ra nuclide from soil by three woody species *Betula pendula*, *Sambucus nigra* and *Alnus glutinosa* during the vegetation period, *Journal of Environmental Radioactivity*. 2007. Vol. 97. P. 76–82. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2007.03.008
- Starik I. E. *Fundamentals of Radiochemistry*. L.: Nauka, 1969. 247 p.
- State report «On the state of the environment of the Komi Republic in 2016», *Ministerstvo promyshlennosti, prirodnih resursov, energetiki i transporta Respubliki Komi; GBU RK «TFI RK»*. Syktyvkar, 2017. 179 p.

- Taskaev A. I., Landa E. R., Guryev D. V., Golovko-Butler N., Kraemer T. F. Vodnyi: a long-term, low-level radiation exposure field site in Russia, *Japanese Journal of Health Physics*. 2003. Vol. 38. P. 332–343. DOI: 10.5453/jhps.38.332
- Titaeva N. A. Taskaev A. I. Migration of heavy natural radionuclides in a humid zone, *Otv. red. V. I. Pavlockaya. L.: Nauka*, 1983. 232 p.
- Xie Ya., Cao Ya., Xie Yo. Global-scale latitudinal patterns of twelve mineral elements in leaf litter, *Catena*. 2022. Vol. 208. P. 105743. DOI: 10.1016/j.catena.2021.105743
- Yue K., Yang W., Tan B., Peng Ya., Huang C., Hu Z., Ni X., Yang Yu., Zhou W., Zhang L., Wu F. Immobilization of heavy metals during aquatic and terrestrial litter decomposition in an alpine forest, *Chemosphere*. 2019. Vol. 216. P. 419–427. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.10.169