

АККУМУЛЯЦИЯ УРАНА И РАДИЯ-226 ВОДНЫМИ И НАЗЕМНЫМИ МХАМИ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ БЫВШИХ ОБЪЕКТОВ ПО ДОБЫЧЕ РАДИЯ

Рачкова Н.Г.^{1,2}, Шапошникова Л.М.¹

¹ *Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, e-mail: nata.rachkova.67@mail.ru;*

² *Сыктывкарский государственный университет имени Питирима Сорокина, Сыктывкар*

На основе анализа содержаний и форм нахождения радионуклидов в биомассе, поверхностных водах, почвогрунтах и донных осадках подтверждена высокая способность водных и наземных мхов к аккумуляции урана и радия-226 в северотаёжных экосистемах зоны влияния бывшего радиевого промысла. При обогащенности техногенно нарушенных абиотических сред элементами минерализации и в присутствии в приповерхностных растворах форм нахождения радионуклидов, отличающихся дисперсностью частиц, моховый покров долговременно ограничивает миграцию радиоактивных загрязнений. Механизм этого процесса для водных мхов преимущественно связан с поверхностной сорбцией взвешенного радия и менее интенсивной аккумуляцией в клеточных структурах растворимых форм урана. В наземном моховом покрове сорбционная активность биомассы сфагнома выше, чем плеврозиума Шребера. Показатели биологического поглощения радия-226 у мхов с разными условиями местообитания, как правило, значительнее по сравнению с ураном.

Ключевые слова: радиоактивное загрязнение, водные и наземные мхи, уран, радий-226, биологическое поглощение, формы нахождения радионуклидов.

URANIUM AND RADIUM-226 ACCUMULATION BY AQUATIC AND TERRESTRIAL MOSSES IN IMPACT ZONE OF THE FORMER RADIUM PRODUCTION OBJECTS

Rachkova N.G.^{1,2}, Shaposhnikova L.M.¹

¹ *Institute of Biology, Komi SC, Ural Branch of RAS, Syktyvkar, e-mail: nata.rachkova.67@mail.ru;*

² *Pitirim Sorokin Syktyvkar State University, Syktyvkar*

Based on the analysis of the contents and forms of radionuclides in biomass, surface waters, soil and bottom sediments, the ability of aquatic and terrestrial mosses to accumulate uranium and radium-226 in the north taiga ecosystems of the zone of influence of the former radium production has been confirmed. With the enrichment of technogenic-contaminated abiotic media with elements of mineralization and in the presence in the near-surface solutions of the speciation of radionuclides that differ in the dispersion of particles, the moss cover permanently limits the migration of radioactive contaminants. The mechanism of this process for water mosses is mainly associated with surface sorption of suspended radium and less intensive accumulation of soluble uranium in cellular structures. In the ground moss cover, the sorption activity of sphagnum biomass is higher than that of Schreber's pleurosium. The biological uptake of radium-226 in mosses with different habitat conditions, as a rule, are more significant in comparison with uranium.

Keywords: radioactive contamination, aquatic and terrestrial mosses, uranium, radium-226, biological uptake, radionuclide speciation.

Территории производственных объектов бывших радиохимических предприятий и их импактные зоны характеризуются, как правило, значительной неоднородностью радиоактивного загрязнения по площади и в профиле грунтов, вследствие чего интенсивность биологического поглощения радионуклидов становится труднопрогнозируемым параметром. В этих условиях содержание макро- и микроэлементов, форма нахождения радионуклидов в абиотических компонентах окружающей среды и комплекс многих других факторов опосредованно влияют на аккумуляцию радиоактивных поллютантов живыми организмами. При благоприятном стечении обстоятельств их способность к поглощению радиоактивных веществ может определять процессы

перераспределения последних в ландшафте и между компонентами окружающей среды.

Цель исследования – рекогносцировочная оценка способности мохообразных к аккумуляции и прочному поглощению урана и радия-226 в северотаёжных водных и наземных экосистемах зоны влияния бывших производственных объектов радиевого промысла с формированием вторичных очагов радиоактивного загрязнения.

Большинство промплощадок предприятия расположены в пойме или на надпойменных террасах р. Ухта и её мелких притоков. Образцы водных мхов, воды и донных отложений были отобраны на импактном участке русла Ухты (по 2 образца), а также в ручьях и на заболоченной нижней террасе территории приповерхностного хранилища твёрдых радиоактивных отходов промысла (по 5 образцов), служившей транзитным элементом ландшафта при миграции радиоактивно загрязнённых поверхностных вод в речную сеть. На мелководье в реке встречались фонтиналис противопожарный *Fontinalis antipyretica* и дрепанокладус крючковатый *Drepanocladus aduncus*, в болоте и мелких водотоках участка складирования отходов кроме последнего был распространён каллиергон гигантский *Calliergon giganteum*. В местах пробоотбора на территории хранилища радиационный фон не превышал 0,8 мкЗв/ч, на прибрежных мелководных площадках – 0,14 мкЗв/ч.

Наземные мхи, напротив, отбирали вне зоны активного водообмена на равнинном залесённом участке, занятом в период деятельности промысла производством по получению древесного угля. После использования его технологические отходы, загрязнённые радионуклидами уранового ряда, были возвращены на промплощадку, что и обусловило её радиоактивное загрязнение. Таким образом, к моменту проведения исследований почвенный покров большей части этой территории оказался представлен техноподзолистой почвой, характеризующейся наличием подстилки мощностью до 4 см, под которой находится слой радиоактивного материала толщиной до 23 см. Глубже него идентифицировались подзолистый и иллювиальный горизонты [8]. К настоящему времени средняя мощность амбиентного эквивалента дозы в зоне локализации отвалов составила 1,72 мкЗв/ч, на незагрязненной ими территории – снижалась по сравнению с этим уровнем до 10 раз. Радиоактивные отходы на участке были полностью покрыты дерниной. Слабо развитая травянистая растительность населяла загрязнённую радиоактивными отходами часть участка под пологом смешанного леса, в котором преобладали ель сибирская, сосна обыкновенная, береза пушистая, рябина обыкновенная, ольха серая, осина и ива. Отобранные мохообразные были распространены на территории, примыкающей к месту локализации радиоактивных отходов. Среди них были определены сфагновые (сфагнум *Sphagnum* sp.) и зелёные мхи (плеврозиум Шребера *Pleurozium schreberi* и кукушкин лен *Polytrichum commune*). Всего опробовано 12 образцов плеврозиума Шребера и 7 образцов сфагнума.

Содержание радия-226 в объектах окружающей среды определяли эманационным методом на приборе «Альфа-1» [7], урана – по люминесценции перлов с NaF на фотометре «ЛЮФ-57» [1]. Наряду с интенсивностью поступления радия-226 и урана в биомассу оценивали содержание и форму нахождения изучаемых радионуклидов в воде или почвенной толще (0-20 см) в местах произрастания мохообразных методами ультрафильтрации [6] и последовательных вытяжек [3; 8]. Для изучения прочности поглощения радионуклидов водными мхами применяли химическое фракционирование биомассы [5; 9].

Исследование грунтов на участке произрастания наземных мохообразных подтвердило, что наибольшее количество радионуклидов было сосредоточено в слое почвенного профиля (0–20 см), богатом вымытым органическим веществом ($C_{\text{орг}} = 43\%$). По нашим оценкам [8], доля радия, способного десорбироваться из этой толщи и включаться в результате трансформации в циклы биологического поглощения, составляла в сумме не менее 57% валового содержания радионуклида при парциальном вкладе фракций соединений, растворимых в воде, 1 М растворах ацетата аммония и соляной кислоты около 3, 6 и 48% соответственно. Высокой подвижности радиоактивного элемента могли способствовать свойственный таёжной зоне кислый характер почвенного гумуса (pH 4,5) и обогащенность грунта элементами I и II групп Периодической системы, что активизирует выщелачивание поллютантов минерализованными почвенно-грунтовыми водами. Однако даже в этих условиях значительное количество радия (43%) было иммобилизовано в грунте. Удельные активности урана в точках отбора плеврозиума Шребера составили 7,2-142 мБк/г, радия - 0,03-1,2 Бк/г. Для сфагнума соответствующие показатели изменялись в пределах 6,5-28,1 и 0,03-0,5 Бк/г.

Источником поступления радиоактивных веществ в биомассу мохообразных на местообитаниях с высокой обводнённостью стали транзитные грунтовые и поверхностные воды и взвеси, вымываемые из почвогрунтов хранилища отходов, сосредоточенных в основном на верхней террасе этого комплекса. Установлено, что радиоактивные элементы перераспределялись в ландшафте за счёт вторичных процессов сорбции на природных сорбирующих материалах – болотных грунтах, донных отложениях и биомассе мохообразных, с высокой плотностью населяющих нижнюю террасу территории хранилища.

Об этом свидетельствует содержание урана и радия в объектах окружающей среды [5; 6]. Так, в донном материале из ручьёв и в болотном грунте удельная активность урана превосходила содержание радионуклидов в технологических отходах промысла до 1,5 и 40 раз преимущественно за счёт сорбции гидроксидами железа и марганца, а также органическими веществами. Вторичное закрепление на природных сорбентах растворимого радия было менее выражено и выявлялось только в сравнении с фоновыми донными осадками и грунтами (таблица). В то же время высокие показатели его биоаккумуляции в

большинстве случаев контрастировали с соответствующими более низкими значениями для урана.

Содержание и коэффициенты накопления (Кн) урана и радия-226 водными мхами

Водоем	Содержание урана и радия-226		Кн, мл/г в.с.в.	Уд. электро- проводность вод, мкСм/см
	в воде, $n \times 10^{-2}$ Бк/л	в биомассе, $n \times 10^{-2}$ Бк/г золы		
фоновый участок речной сети в районе радиевого промысла				
<i>Fontinalis antipyretica</i> , р. Лыя-Ель	<u>0,2</u> * н/д	<u>0,4</u> * н/д	<u>346</u> * н/д	152
р. Ухта, импактная зона				
<i>Drepanocladus aduncus</i> , июнь 2013 г.	н/д 2,1	<u>0,9</u> 31,4	н/д 4070	470
<i>Drepanocladus aduncus</i> , июнь 2013 г.	н/д 1,9	<u>6,5</u> 75,7	н/д 15400	466
территория хранилища РАО				
<i>Calliergon giganteum</i> , июнь 2012 г.	<u>131,6</u> 8,6	<u>278,1</u> 365,7	<u>317</u> 6380	1200
<i>Calliergon giganteum</i> , июнь 2012 г.	<u>54,1</u> 0,7	<u>494,5</u> 79,9	<u>722</u> 9710	1030
<i>Calliergon giganteum</i> , июнь 2012 г.	<u>54,6</u> 3,0	<u>28,9</u> 83,0	<u>58</u> 3100	1030
<i>Drepanocladus aduncus</i> , июнь 2012 г.	<u>24,0</u> 9,8	<u>25,1</u> 52,8	<u>483</u> 2490	1900
<i>Drepanocladus aduncus</i> , июль 2012 г.	<u>36,9</u> 15,0	<u>191,2</u> 89,3	<u>676</u> 780	2100

*в числителе – показатели биоаккумуляции урана, в знаменателе - радия-226.

Причина этого состоит не только в известном сходстве химических свойств радия с биологически важными макроэлементами щелочноземельной группы, но и в значительной доле взвешенной компоненты радионуклида в водах техногенной и импактной зон. Её вклад в разные отборы мог определять до 65% удельной активности водных образцов. При поступлении в речную сеть растворимая компонента радия перераспределялась во взвешенное вещество [6], а уран сохранялся в растворе (рис. 1).

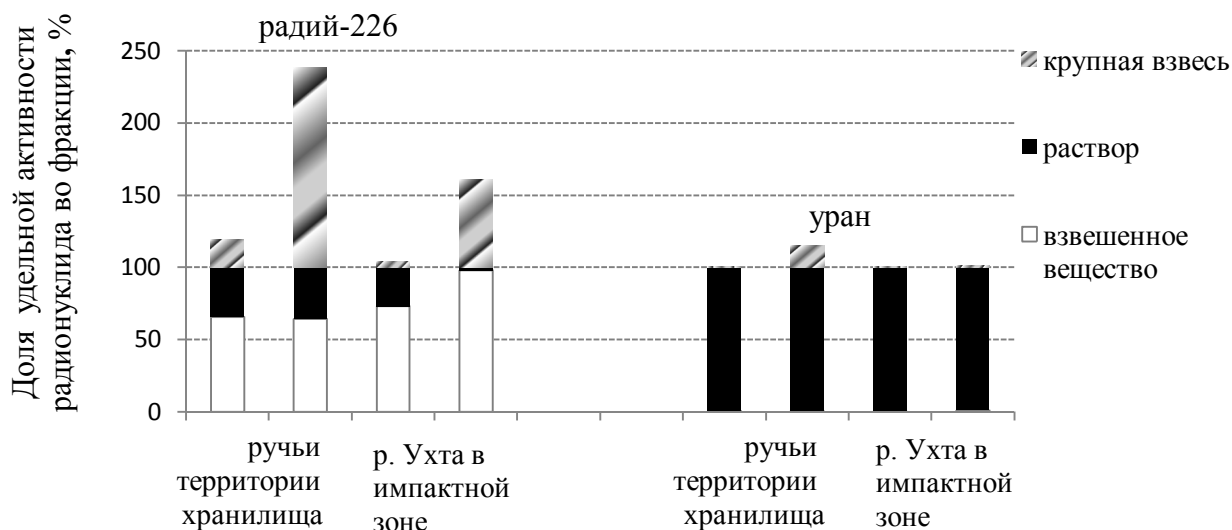


Рис. 1. Формы нахождения урана и радия-226 в поверхностных водах (% удельной активности) района бывшего радиевого промысла (июнь 2013 г.)

По-видимому, это и объясняет более высокую способность мхов исследуемой акватории к поглощению радия-226, в том числе из вод реки, хотя достоверную статистическую связь между параметрами его биологического поглощения и содержанием взвешенной формы не удалось установить. Однако методом химического фракционирования было подтверждено, что основное количество (до 74%) аккумуляированного мохообразными радия можно вытеснить из растительной ткани без её полного разрушения воздействием нейтральными и слабокислыми растворами (рис. 2). Принято считать, что десорбированные подобным образом фракции поллютантов депонированы на поверхности биомассы [9]. Для сравнения: нардомсия из импактной речной сети содержит радия кратно меньше, чем мхи.

Способность накапливать поллютанты в своих тканях предопределяется анатомическими, морфологическими и физиологическими особенностями мохообразных, поглощающих воду и минеральные вещества не только ризоидами, но и всей поверхностью тела. Показатели поглощения наземными мхами радионуклидов коррелировали с их концентрацией в почве, однако степень этой зависимости зачастую была слабой. Коэффициенты корреляции содержаний урана в плеврозиуме Шребера и сфагнуме с удельной активностью почвы составили 0,32 и 0,83, радия – 0,42 и 0,23 соответственно. Поскольку один и тот же радиоактивный материал был источником радионуклидов в почве, то их концентрации в ней были связаны с коэффициентами корреляции 0,66 для слоя (0-5 см) и 0,94 для толщи (5-20 см). Содержания исследуемых радиоактивных элементов во мхах также коррелировали друг с другом, однако статистическая связь была менее тесной ($r = 0,48$) (рис. 3).

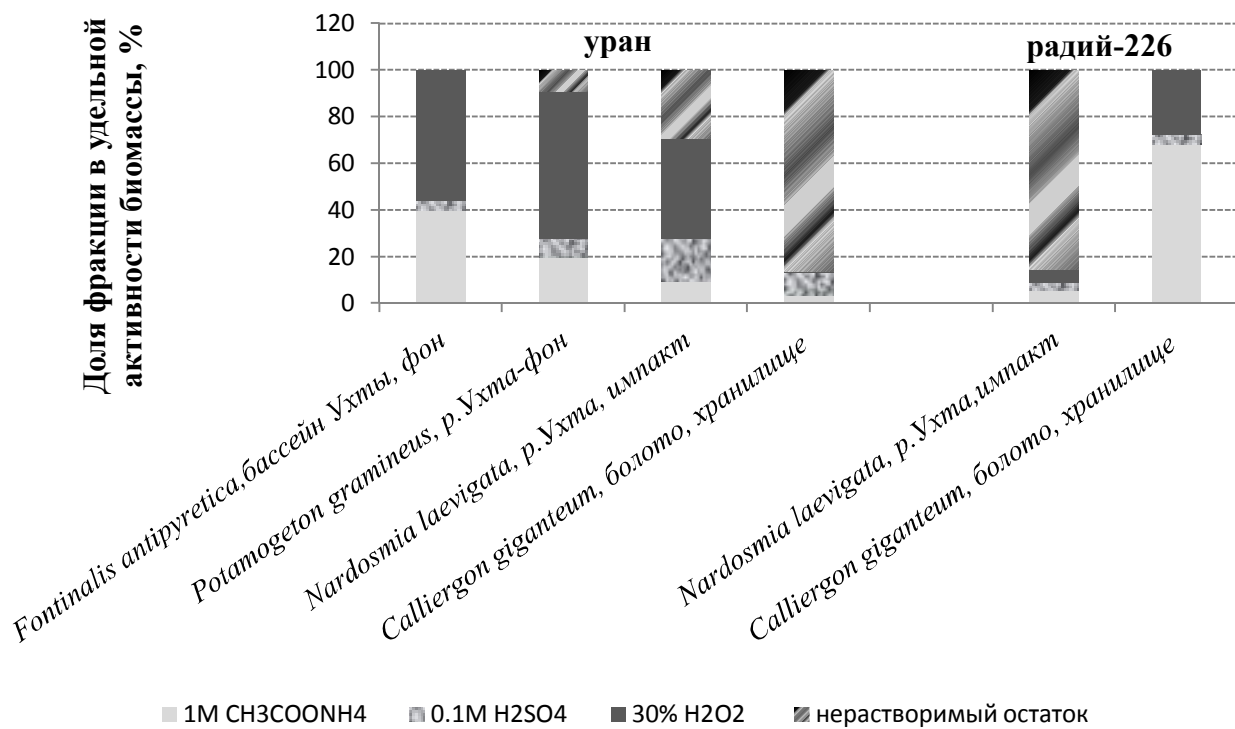


Рис. 2. Химические фракции урана и радия-226, выделенные из биомассы гидрофитов

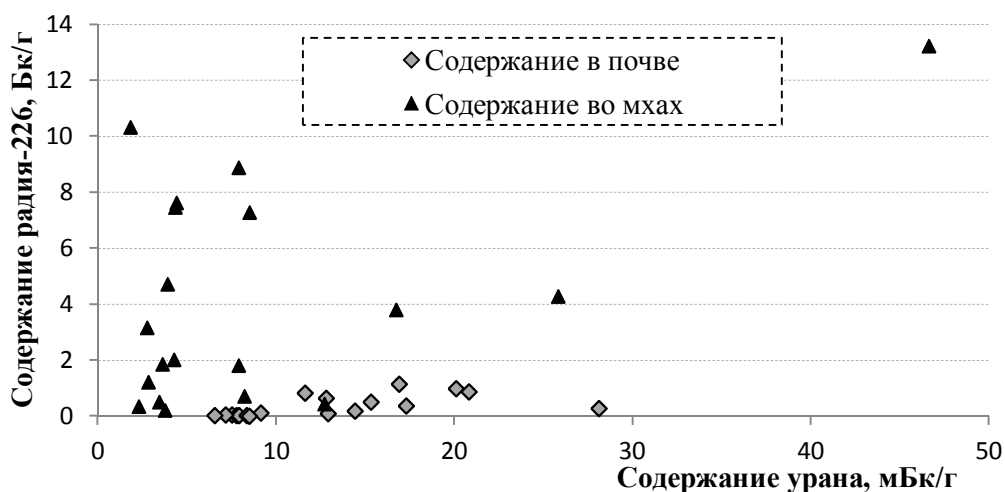


Рис. 3. Содержания урана и радия-226 в сопряжённых образцах наземных мхов и грунтов

Сравнение отношения содержаний радия и урана в образцах почвы и соответствующих величин для мхов свидетельствует о высокой избирательности накопления ими радионуклидов. При значениях для загрязнённого грунта 1,1–73,0 частное удельных активностей биомассы варьирует от 35 до 5747, составляя в среднем 865. При этом сфагнум более склонен к поглощению урана, на что указывает высокое содержание последнего в биомассе, изменяющееся в диапазоне концентраций 2,3–46,6 мБк/г. Верхний предел удельной активности радиоактивного элемента для образцов плеврозиума был в 3,5 раза ниже. Биоаккумуляция радия-226 на обоих мхах отвечала этому же уровню. Коэффициенты

биологического поглощения (КБП) радионуклида, позволяющие оценить количественно кратность превышения его содержания в золе растений над соответствующей величиной для озолённой почвы, тем не менее были значительно выше, чем для урана, и могли достигать для плеврозиума 57, сфагнома – 131. Практически во всех образцах мхов содержание радия было выше его удельной активности в почве. Несмотря на то что оба вида мха являются хорошими концентраторами урана и радия, КБП для сфагнома выше, чем для плеврозиума Шребера (рис. 4). Это вполне согласуется с имеющимися данными [2; 4] о сравнительно больших удельной поверхности и катионообменной ёмкости его биомассы, величина которых конкурирует и даже кратно превосходит соответствующие показатели для таких известных сорбентов растительного происхождения, как лигнин- и целлюлозосодержащие материалы, биомасса некоторых мицелиальных грибов и лишайников.

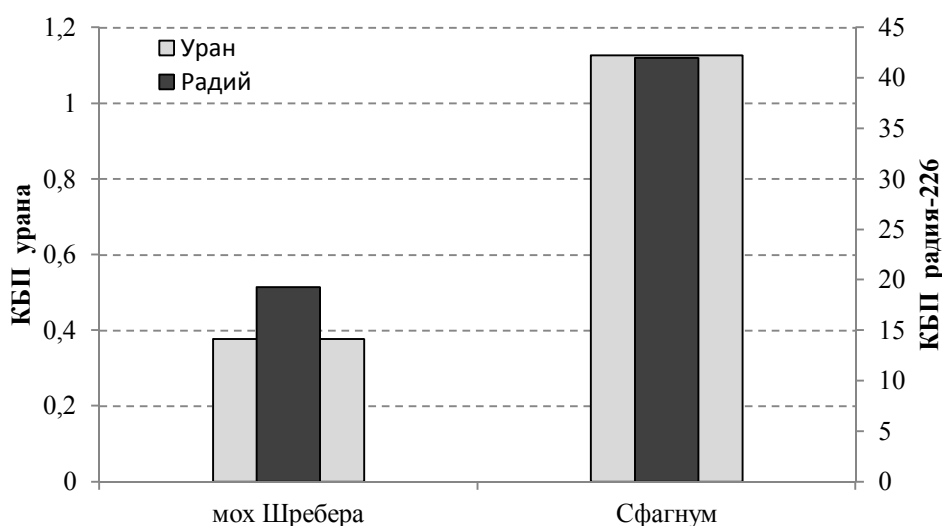


Рис. 4. Средние значения КБП урана и радия-226 для наземных мхов

Результаты проведённых исследований подводят нас к заключению о весомой роли мохообразных наземных и водных экосистем зон техногенного влияния в аккумуляции урана и радия-226 из загрязнённых водных сред и почвы и в ограничении подвижности радионуклидов. Для радиоактивно загрязнённых вод мхи зоны техногенеза и их импактной территории способны выполнять функцию фильтрующего биоматериала и барьера для миграции радиоактивных загрязнений. Биомасса водных мохообразных участвует в их разгрузке от поллютантов по механизму поглощения растворимых соединений, что характерно для урана, и путём поверхностного поглощения радиоактивных взвесей, что наиболее очевидно для радия-226. Изучение распределения радионуклидов в почвенно-растительном покрове радиоактивно загрязнённых биогеоценозов территории бывшего

радиевого промысла подтвердило высокую концентрирующую способность наземных мхов (сфагнума и плеврозиума Шребера) в отношении радия и урана и выявило сравнительно большую сорбционную активность биомассы сфагнума в этих процессах. С учётом многолетнего цикла вегетации функцию ограничения подвижности радиоактивных веществ моховый покров участков территорий бывшего радиевого промысла выполняет долговременно даже в условиях высокой минерализованности природных растворов.

Работа выполнена в рамках темы Госзадания № 115012860038 «Реакция растений и животных на хроническое действие тяжелых естественных радионуклидов в эксперименте и природе» при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ и Правительства Республики Коми №16-45-110051 р_а.

Список литературы

1. Аналитическая химия урана / ред. А.П. Виноградов. – М.: Наука, 1962. – С. 143-165.
2. Кочева Л.С. Новые сорбенты радионуклидов растительного происхождения / Л.С. Кочева, А.П. Карманов, И.И. Шуктомова и др. // Экология северных территорий России. Проблемы, прогноз ситуации, пути развития, решения: материалы Междунар. конф. (Архангельск, 17-22 июня 2002 г.). – Архангельск: Правда Севера, 2002. – Т. 2. – С. 428-432.
3. Носкова Л.М. Сравнительная оценка поглощения ^{238}U и ^{226}Ra травянистой и древесной растительностью в условиях техногенного загрязнения / Л.М. Носкова, И.И. Шуктомова // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2010. – Т. 50. – № 6. – С. 642-648.
4. Подтероб А.П. Определение катионообменной емкости некоторых видов растительного сырья и материалов на его основе // Вестник БГУ. – 2008. – Сер. 2. – № 3. – С. 76-81.
5. Рачкова Н.Г. Сравнительный анализ миграционной способности и концентрирования природного урана в экосистемах рек Печорского бассейна / Н.Г. Рачкова, И.И. Шуктомова // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2013. – Т. 53. – № 1. – С. 84-94.
6. Рачкова Н.Г. Фазовое распределение радия-226 в поверхностных водах района расположения бывшего радиодобывающего предприятия / Н.Г. Рачкова, И.И. Шуктомова, А.П. Карманов // Бутлеровские сообщения. – 2016. – Т. 45. – № 3. – С. 60-67.
7. Старик И.Е. Основы радиохимии. – Л.: Наука, 1969. – 647 с.
8. Шапошникова Л.М. Особенности распределения урана, тория и радия в профиле техноподзолистой почвы / Л.М. Шапошникова, И.И. Шуктомова // Успехи современного естествознания. – 2016. – № 6. – С. 48-52.
9. Bolsunovsky A. Accumulation and release of Am by a macrophyte of the Yenisei River (*Elodea canadensis*) / A. Bolsunovsky, T. Zotina, L. Bondareva // J. Environ. Radioactivity. – 2005. – V. 81. – P. 33-46.