



Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 550.42

DOI: 10.19110/geov.2022.5.3

Удельная активность и особенности вертикальной миграции стронция-90 в торфянике Мурманской области

А. А. Лукошкова, Е. Ю. Яковлев, А. С. Орлов

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики УрО РАН, Архангельск
a.lukoshkova@yandex.ru, evgeny.yakovlev@fciarctic.ru, alseror@yandex.ru

Торфяники Арктических территорий являются хранилищами радиоактивных загрязнений. Изучены физико-химические свойства торфа, удельная активность и особенности вертикальной миграции ^{90}Sr в торфяном профиле Мурманской области. Составлена корреляционная матрица по изученным показателям. Установлен фактор, определяющий локализацию ^{90}Sr в торфе. Определены источники изотопа для региона.

Реакция среды торфа кислая ($4.2 \leq \text{pH}_{\text{water}} \leq 4.9$; $3.6 \leq \text{pH}_{\text{salt}} \leq 4.1$). Зольность торфа средняя и высокая ($5.2 \% \leq A_{\text{sh}} \leq 28 \%$). Доля органического вещества в торфяном профиле более 70 %. Верхняя часть профиля засолена (soluble salts > 0.3 %). Доля карбонатов в торфяном профиле незначительная (0.42–0.83 %).

В каждой пробе торфа зафиксирована активность ^{90}Sr (0.55–7.7 Бк/кг). Активность техногенного радионуклида находится ниже установленной допустимой нормы и в пределах интервала, типичного для всех почв России. Изотоп ^{90}Sr локализуется в верхних слоях профиля и на глубине более 16 см. Локализация ^{90}Sr в торфяных слоях обусловлена содержанием водорастворимых солей ($r = 0.85$). Основными источниками изотопа для Мурманской области являются прошлые глобальные выпадения от ядерных испытаний, чернобыльской аварии и текущие локальные выпадения от объектов ядерно-топливного комплекса.

Ключевые слова: торфяник, физико-химические свойства, стронций-90 (^{90}Sr), вертикальная миграция, Мурманская область.

Specific activity and features of vertical migration of strontium-90 in the peat bog of the Murmansk region

A. A. Lukoshkova, E. Yu. Yakovlev, A. S. Orlov

Federal Center for Integral Arctic Research UB RAS, Arkhangelsk

The peatlands of the Arctic territories are repositories of radioactive contaminations. The physicochemical properties, specific activity and features of vertical migration of ^{90}Sr in the peat profile of the Murmansk region have been studied. A correlation matrix was compiled according to the studied indicators. The factor that determines the localization of ^{90}Sr in peat has been established. The sources of isotope for the region were determined.

The reaction of the peat medium is acidic ($4.2 \leq \text{pH}_{\text{water}} \leq 4.9$; $3.6 \leq \text{pH}_{\text{salt}} \leq 4.1$). The ash content of peat is medium and high ($5.2 \% \leq A_{\text{sh}} \leq 28 \%$). The share of organic matter in the peat profile is more than 70 %. The upper part of the profile is saline (soluble salts > 0.3%). The share of carbonates in the peat profile is insignificant (0.42–0.83 %).

^{90}Sr activity (0.55–7.7 Bq/kg) was recorded in each peat sample. The activity of the technogenic radionuclide is below the established permissible norm and within the range typical for all Russian soils. The ^{90}Sr isotope is localized in the upper layers of the profile and at a depth of more than 16 cm. The localization of ^{90}Sr in peat layers is due to the content of water-soluble salts ($r = 0.85$). The main sources of the isotope for the Murmansk region are past global fallout from nuclear tests, the Chernobyl accident and current local fallout from nuclear fuel facilities.

Keywords: peat bog, physical and chemical properties, strontium-90 (^{90}Sr), vertical migration, Murmansk region.

Введение

Арктические территории, к которым относится Мурманская область, при освоении атомной энергии подверглись существенному воздействию техногенной радиоактивности в результате глобальных и локальных ядерных испытаний, поступлений в арктические моря техногенных радионуклидов от западноев-

ропейских радиохимических заводов Великобритании и Франции, чернобыльской катастрофы [10].

Торфяные отложения являются ценным объектом для долговременной ретроспективной оценки радиационной обстановки [11]. В Мурманской области болота занимают значительную площадь (~ 3048,9 тыс. га) [7]. Наиболее развиты аапа-болота, залегающие в сильно обводненных местах и получающие водно-ми-

Для цитирования: Лукошкова А. А., Яковлев Е. Ю., Орлов А. С. Удельная активность и особенности вертикальной миграции стронция-90 в торфянике Мурманской области // Вестник геонаук. 2022. 5(329). С. 21–25. DOI: 10.19110/geov.2022.5.3.

For citation: Lukoshkova A. A., Yakovlev E. Yu., Orlov A. S. Specific activity and features of vertical migration of strontium-90 in the peat bog of the Murmansk region. Vestnik of Geosciences, 2022, 5(329), pp. 21–25, doi: 10.19110/geov.2022.5.3.

неральное питание за счет атмосферных осадков, подземных вод и поверхностного стока с прилегающих территорий. При питании торфяники аапа-болот депонируют загрязнители и представляют собой их хранилище, в том числе радиоактивных изотопов как прошлых, так и текущих загрязнений, создавая опасность для биоты и человека. Источниками текущих радионуклидов на данной территории могут быть объекты ядерно-топливного комплекса, атомного ледокольного флота, Северного флота России [10].

В настоящее время сведения об уровне загрязнения торфяников арктических территорий техногенным изотопом ^{90}Sr отсутствуют. В связи с этим цель данного исследования — выявить уровень активности и особенности вертикальной миграции ^{90}Sr в профиле торфяника, отобранного на территории Мурманской области.

Объекты и методы

Объектом исследования являлись торфяные отложения Мурманской области. Место взятия торфяной колонки — в 12 км юго-восточнее города Мурманска (координаты точки взятия колонки: N68.87057°, E33.19594°). Шифр колонки — ТМ-1, глубина — 36 см. Торфяную колонку отбирали согласно государственному стандарту [5] в летний период 2019 года. После отбора колонка торфа была разделена на 17 слоев (интервал деления 2 см за исключением двух верхних горизонтов 0–3.5 см и 3.5–6.0 см).

В лабораторных условиях в каждом слое торфа были определены физико-химические свойства: актуальная (pH_{water}) и обменная (pH_{salt}) кислотность; зольность (A_{sh}); массовая доля органического вещества (Organic Matter); содержание водорастворимых солей (Soluble salts); массовая доля карбонатов (CO_3^{2-}) и удельная активность радионуклида ^{90}Sr согласно государственным стандартам и актуальным методикам [1–4, 6].

Актуальную и обменную кислотность определяли потенциометрическим методом [3] в водной и солевой (раствор KCl с концентрацией 1 моль/дм³) вытяжках. Значение pH измеряли на анализаторе жидкостей «Эксперт 001-3» с применением комбинированного стеклянного электрода ЭСК-10603.

Путем прокаливания сухих проб торфа получали зольные остатки ($200\text{ °C} \leq t \leq 525\text{ °C}$), потери ($525\text{ °C} \leq$

$t \leq 900\text{ °C}$). Определение зольности, массовой доли карбонатов проводили гравиметрическим методом. Массовую долю органического вещества определяли расчетным методом, учитывая зольность [2, 4].

Водорастворимые соли из торфа извлекали дистиллированной водой. Почвенную суспензию фильтровали. Фильтрат выпаривали на водяной бане, плотный остаток водной вытяжки сушили при 105 °C. Содержание водорастворимых солей определяли гравиметрическим методом [1].

Для определения зольности, массовой доли органического вещества, содержания водорастворимых солей, массовой доли карбонатов применяли сушильный шкаф Memmert UF75plus, муфельную печь ЭКПС-10 и аналитические весы ВЛ-224В.

Удельную активность радионуклида определяли бета-радиометрическим методом с радиохимической подготовкой [6]. Методика основана на измерении бета-излучения счетного образца, содержащего селективно выделенный из пробы иттрий-90 (^{90}Y), являющийся дочерним продуктом распада стронция-90 и находящийся с ним в радиоактивном равновесии в пробе, и расчете удельной активности ^{90}Y (^{90}Sr) в пробе. Радиохимический выход иттрия-90 контролировали весовым методом при добавлении в пробу определенного количества стабильного иттрия. Мешающее влияние радионуклидов с энергиями бета-частиц, близкими к энергии бета-излучения иттрия-90, устраняли радиохимическим способом при двойном осаждении оксалатов и хроматографическом отделении иттрия-90. Готовый осадок переносили в предварительно взвешенную подложку радиометра. Измерение счетных образцов выполнялось с применением альфа-бета-радиометра РСК-01А «Абелия».

Результаты и обсуждение

Характеристика физико-химических свойств торфяника. Актуальная кислотность, связанная с содержанием свободных H^+ и OH^- в почвенном растворе, и обменная, связанная с содержанием H^+ и Al^{3+} в почвенном поглощающем комплексе, находятся в пределах значений 4.2–4.9 и 3.6–4.1 соответственно. Почвенный раствор и твердая фаза исследуемого торфа имеют кислую реакцию среды. С глубиной профиля кислотность уменьшается (рис. 1).

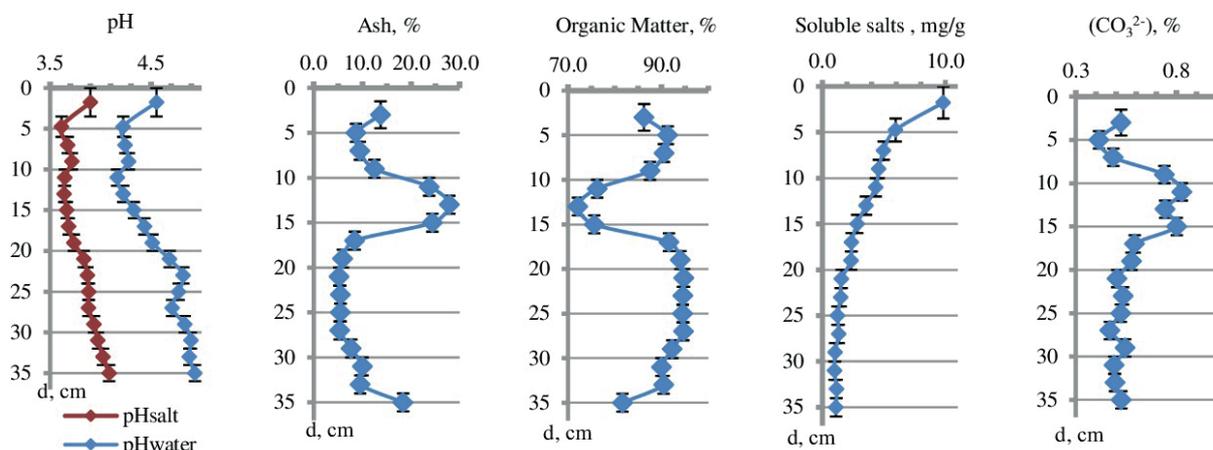


Рис. 1. Зависимость физико-химических свойств от глубины в торфяном профиле ТМ-1

Fig. 1. Dependence of physicochemical properties on depth in TM-1 peat profile



Профиль представляет собой высокозольный и средnezольный торф ($5.2 \% \leq A_{sh} \leq 28 \%$), (рис. 1). Повышенная зольность ($A_{sh} > 10 \%$), обусловленная наличием песка, глины и минеральными веществами, характерна для верхних (1, 4–7 слоев) и нижнего слоя; средняя зольность ($5.0 \% < A_{sh} < 10 \%$) — для 2–3, 8–16 слоев.

Доля органического вещества, основного компонента торфяника, находится в интервале от 72 до 95 % (рис. 1). Максимальное значение показателя наблюдается в слое 20–22 см.

Содержание водорастворимых солей варьирует в диапазоне 1.0–9.8 мг/г (рис. 1). Верхние слои торфяника (глубина менее 17 см) имеют слабую и среднюю степени засоленности (количество водорастворимых солей более 0.3 %), что, возможно, обусловлено длительным и постоянным избыточным увлажнением. На глубине 17 см и более засоленность отсутствует (количество водорастворимых солей составляет менее 0.3 %). Торфяник по глубине залегания водорастворимых солей характеризуется как солончаковый.

Массовая доля карбонатов составляет 0.42–0.83 %. В слое 10–12 см наблюдается максимальное значение показателя, возможно обусловленное выщелачиванием из верхних слоев. Массовая доля карбонатов с глубиной профиля снижается (рис. 1).

Для физико-химических свойств торфа наблюдаются значимые корреляционные связи (рис. 3): прямые — $pH_{water} - pH_{salt}$ ($r = 0.94$), $A_{sh} - (CO_3^{2-})$ ($r = 0.77$); обратные — $pH_{water} - (CO_3^{2-})$ ($r = -0.55$), $pH_{salt} - (CO_3^{2-})$ ($r = -0.50$), $pH_{salt} - Soluble\ salts$ ($r = -0.61$), $A_{sh} - Organic\ Matter$ ($r = -1.0$), $Organic\ Matter - (CO_3^{2-})$ ($r = -0.77$).

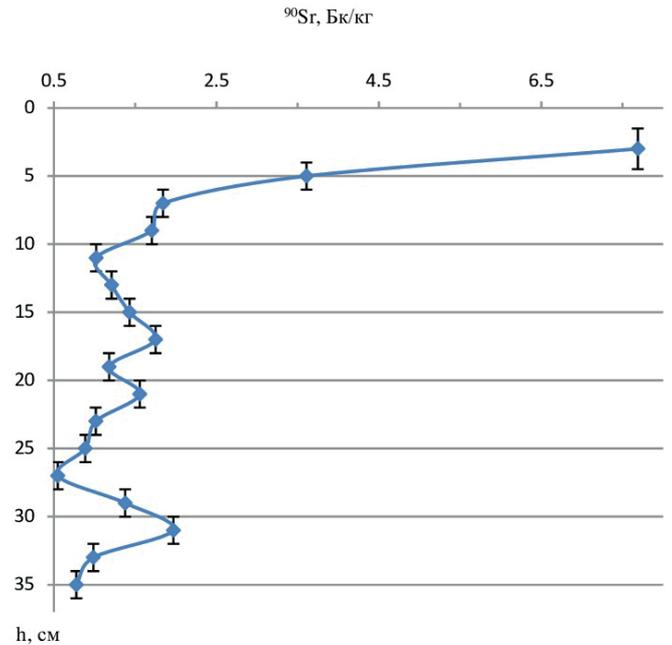


Рис. 2. Зависимость удельной активности ^{90}Sr от глубины торфяного профиля TM-1

Fig. 2. Dependence of the specific activity of ^{90}Sr on the depth of TM-1 peat profile

Удельная активность радионуклида ^{90}Sr . Во всех пробах торфяного профиля наблюдается присутствие радионуклида (рис. 2). Удельная активность ^{90}Sr находится в интервале 0.55–7.7 Бк/кг (типичный интервал для всех почв России 0.80–8.6 Бк/кг). Среднее значение

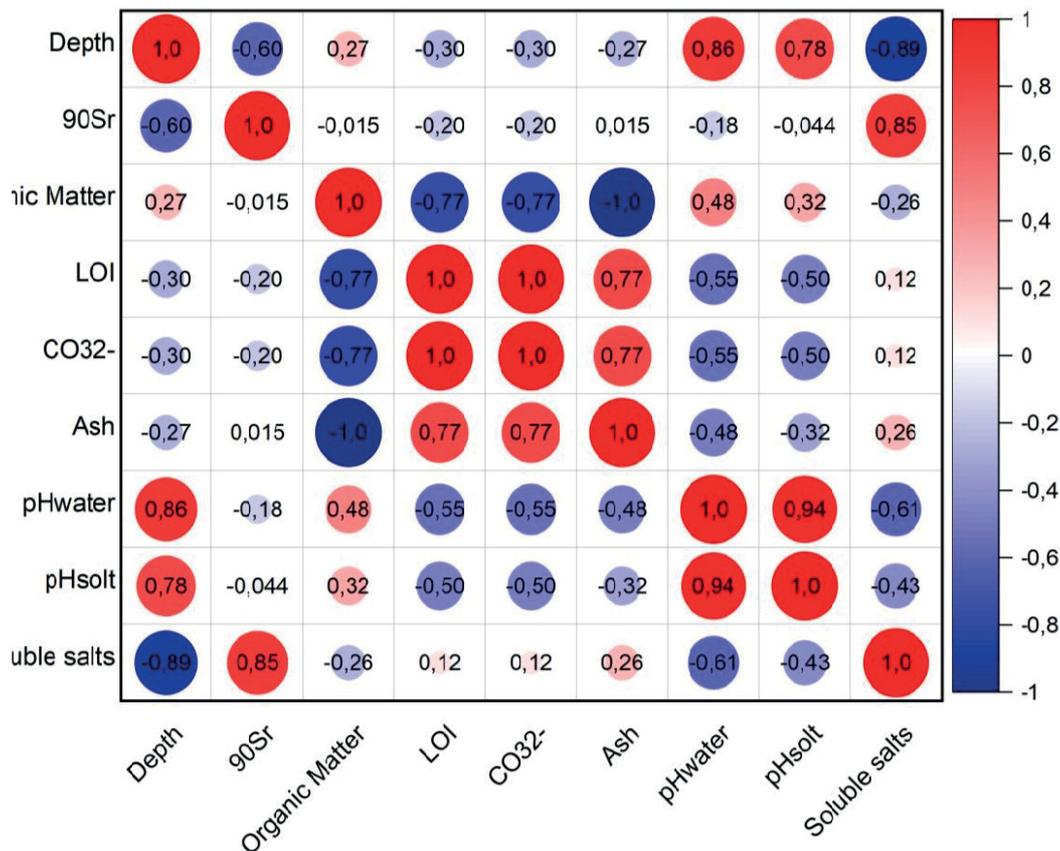


Рис. 3. Корреляционная матрица для набора данных по торфяному профилю TM-1

Fig. 3. Correlation matrix for TM-1 peat profile dataset



ние составляет 1.8 ± 0.02 Бк/кг, что не превышает установленный минимально значимый норматив [8] и ниже среднего параметра для всех почв России (4.7 Бк/кг). Наибольшая удельная активность ^{90}Sr фиксируется в верхней части профиля до глубины 8–10 см, максимум активности (7.7 Бк/кг) отмечается в самом верхнем слое 0–3.5 см, что, возможно, обусловлено поступлением радионуклида при текущих локальных выпадениях от объектов ядерно-топливного комплекса и его биогенным накоплением. Удельная активность ^{90}Sr в снеге, выпавшем в 2018–2019 годах в Мурманской области, составляет 0.30–0.40 Бк/л [7].

Радионуклид неравномерно распределяется по всему торфяному профилю (рис. 2). Ниже глубины 10 см наблюдается три пика активности радионуклида. Пик на глубине 16–18 см, вероятно, связан с аварией на Чернобыльской АЭС (1986 год), а более глубокие (20–22 см и 30–32 см), возможно, свидетельствуют о прошлых глобальных выпадениях в результате ядерных испытаний до 1963 года.

Содержание водорастворимых солей играет важную роль в накоплении радионуклида ($r = 0.85$), (рис. 3). Sr является щелочно-земельным элементом, и по своим химическим свойствам Sr^{2+} подобен NH_4^+ , K^+ , Na^+ , карбонаты и фосфаты которых растворимы в воде и обуславливают присутствие анионов CO_3^{2-} , PO_4^{3-} , увеличивающих поглощение (адсорбцию) Sr^{2+} [9].

Выводы

На основании полученных результатов можно отметить отличительное физико-химическое свойство торфяного профиля Мурманской области — засоленность, связанную с условиями формирования торфа. Одновременно установлено, что засоленные слои торфа являются накопителями ^{90}Sr . Удельная активность ^{90}Sr находится в рамках интервала, типичного для всех почв России. Среднее значение удельной активности ^{90}Sr ниже установленного минимально значимого норматива [8] и среднего параметра для всех почв России. Радионуклид в основном локализуется в самом верхнем слое и неравномерно мигрирует вниз по профилю. Вертикальный миграционный путь ^{90}Sr показал, что основными его источниками для региона являются прошлые глобальные выпадения из-за ядерных испытаний, чернобыльской аварии и текущие локальные выпадения на объектах ядерно-топливного комплекса.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых МК-4298.2022.1.5.

Литература

1. ГОСТ 26423-85. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, pH и плотного остатка водной вытяжки. М.: Стандартинформ, 2011. 7 с.
2. ГОСТ 27784-88. Почвы. Метод определения зольности торфяных и оторфованных горизонтов почв. М.: Изд-во стандартов, 1988. 6 с.
3. ГОСТ 11623-89. Торф и продукты его переработки для сельского хозяйства. Методы определения обменной и активной кислотности. М.: Изд-во стандартов, 1990. 5 с.
4. ГОСТ 26213-91. Почвы. Методы определения органического вещества. М.: Изд-во стандартов, 1992. 6 с.

5. ГОСТ 17.4.3.01-2017. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб. М.: Стандартинформ, 2018. 8 с.

6. Методика измерений удельной активности стронция-90 (^{90}Sr) в пробах почв, грунтов, донных отложений и горных пород бета-радиометрическим методом с радиохимической подготовкой. М.: ВИМС, 2013. 19 с.

7. О состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2020 году. Доклад. URL: <https://gov-murman.ru/region/environmentstate> (дата обращения: 04.03.2022).

8. Об утверждении СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)». Постановление главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 07.07.2009 № 47: URL: <https://docs.cntd.ru/document/902170553> (дата обращения: 01.04.2022).

9. Путилина В. С., Галицкая И. В., Юганова Т. И. Сорбционные процессы при загрязнении подземных вод тяжелыми металлами и радиоактивными элементами. Стронций. Аналитический обзор. Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 2013. 95 с.

10. Телелекова А. Д., Евсеев А. В. Радионуклиды в природной среде Кольского полуострова // Эволюция и динамика геосистем. 2014. № 5. С. 89–94.

11. Яковлев Е. Ю., Орлов А. С., Очеретенко А. А., Дружинин С. В., Дружинина А. С. Радионуклиды атмосферных выпадений в торфяно-болотных экосистемах Европейской Субарктики России // Западно-Сибирские торфяники и цикл углерода: прошлое и настоящее: Междунар. материалы Шестого полевого симпозиума. Томск, 2021. С. 214–216.

Reference

1. GOST 26423-85. Pochvy. Metody opredeleniya udel'noy elektricheskoy provodimosti, rN i plotnogo ostatka vodnoy vytyazhki (Soils. Methods for determining the specific electrical conductivity, pH and dense residue of aqueous extract). Moscow: Standartinform, 2011, 7 p.
2. GOST 27784-88. Pochvy. Metod opredeleniya zol'nosti torfyanykh i otorfovannykh gorizontov pochv. (Soils. Method for determining the ash content of peat and peaty soil horizons). Moscow: Publishing house of standards, 1988, 6 p.
3. GOST 11623-89. Torf i produkty yego pererabotki dlya sel'skogo khozyaystva. Metody opredeleniya obmennoy i aktivnoy kislotnosti (Peat and products of its processing for agriculture. Methods for determining exchange and active acidity). Moscow: Publishing house of standards, 1990, 5 p.
4. GOST 26213-91. Pochvy. Metody opredeleniya organicheskogo veshchestva (Soils. Methods for determining organic matter). Moscow: Publishing House of Standards, 1992, 6 p.
5. GOST 17.4.3.01-2017. Okhrana prirody. Pochvy. Obshchiye trebovaniya k otboru prob (Protection of Nature. Soils. General requirements for sampling). Moscow: Standartinform, 2018, 8 p.
6. Metodika izmereniy udel'noy aktivnosti strontsiya-90 (^{90}Sr) v probakh pochv, gruntov, donnykh otlozheniy i gornykh porod beta-radiometricheskim metodom s radiokhimicheskoy podgotovkoy (Methods for measuring the specific activity of strontium-90 (^{90}Sr) in samples of soils, grounds, bottom sediments and rocks by the beta-radiometric method with radiochemical preparation). Moscow: VIMS, 2013, 19 p.
7. Doklad «O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy Murmanskoy oblasti v 2020 godu» (Report «On the state and protection of the environment of the Murmansk region in 2020»). URL: <https://gov-murman.ru/region/environmentstate> (date of access: 03.04.2022)



8. *Postanovleniye glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha Rossiyskoy Federatsii ot 07.07.2009 № 47 «Ob utverzhdenii SanPiN 2.6.1.2523-09 «Normy radiatsionnoy bezopasnosti (NRB-99/2009)» (Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dated 07.07.2009 № 47 "On the approval of SanPiN 2.6.1.2523-09" Standards of radiation safety (NRB-99/2009))*. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902170553> (дата обращения: 01.04.2022).

9. Putilina V. S., Galitskaya I. V., Yuganova T. I. *Sorbtsionnyye protsessy pri zagryaznenii podzemnykh vod tyazhelymi metallami i radioaktivnymi elementami. Strontsiy. Analiticheskiy obzor* (Sorption processes in groundwater pollution with heavy metals and radioactive elements. Strontium. Analytical review). Novosibirsk: SB RAS, 2013, 95 p.

10. Telelekova A. D., Evseev A. V. *Radionuklidy v prirodnoy srede Kol'skogo poluostrova. Evolyutsiya i dinamika geosistem* (Radionuclides in the natural environment of the Kola Peninsula. Evolution and dynamics of geosystems), 2014, № 5, pp. 89–94.

11. Yakovlev E. Yu., Orlov A. S., Ocheretenko A. A., Druzhinin S. V., Druzhinina A. S. *Radionuklidy atmosferykh vypadeniy v torfyano-bolotnykh ekosistemakh Yevropeyskoy subarktiki Rossii. Zapadno-Sibirskiye torfyaniki i tsikl ugleroda: proshloye i nastoyashcheye* (Radionuclides of atmospheric fallout in peat-bog ecosystems of the European subarctic of Russia. West Siberian peatlands and the carbon cycle: past and present). Proceedings of the Sixth International Field Symposium. Tomsk, 2021, pp. 214–216.

Поступила в редакцию / Received 26.04.2022