

УДК 550.42(470.111)

ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ТОРФЯНИКЕ НЕНЕЦКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА

Лукошкова А.А., Яковлев Е.Ю., Орлов А.С., Кудрявцева А.А., Дружинин С.В.

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаврова Российской академии наук Уральского отделения Российской академии наук, Архангельск, e-mail: a.luckoshkova@yandex.ru

В статье представлены результаты исследования физико-химических свойств и удельной активности радионуклидов в торфяном профиле, отобранном на территории Ненецкого автономного округа. Исследование физико-химических параметров показало, что в торфяном профиле наблюдается высокая зольность до 94%, обусловленная наличием наносного песка, глины и минеральных веществ, накопленных растениями. Доля органического вещества достигает 89%. Массовая доля карбонатов в профиле незначительна и варьирует в диапазоне 0,31–0,54%. В торфяном профиле зафиксирована активность радионуклидов: ^{90}Sr (0,25–2,6 Бк/кг), ^{137}Cs (1,4–44 Бк/кг), ^{241}Am (0,39–2,7 Бк/кг), ^{210}Pb (4,0–382 Бк/кг). Активности изученных радионуклидов находятся ниже установленных допустимых норм согласно НРБ-99/2009 и не представляют опасности для биоты и человека. Техногенные радионуклиды сосредоточены в верхних слоях профиля. ^{210}Pb в основном локализуется в самом верхнем слое (0–3 см), существенно убывая вниз по профилю, достигая в нижних слоях равновесия с ^{226}Ra . Максимум активности ^{210}Pb в верхней части профиля обусловлен поступлением радионуклида в виде аэрозольных выпадений с атмосферными осадками. Изотопы ^{90}Sr и ^{137}Cs локализируются в двух слоях профиля и имеют единый вертикальный миграционный путь. Между удельной активностью ^{90}Sr и ^{137}Cs выявлена положительная корреляционная зависимость ($r = 0,87 \pm 0,06$, связь сильная). Удельная активность ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{241}Am , ^{210}Pb уменьшается с глубиной профиля. Установлено, что наибольшие значения удельной активности ^{90}Sr и ^{137}Cs наблюдаются при наибольшей доле органического вещества ($r = 0,87 \pm 0,06$, связь сильная). Между зольностью и удельной активностью ^{90}Sr и ^{137}Cs выявлена отрицательная корреляция ($r = 0,82 \pm 0,09$, (связь сильная), $r = 0,87 \pm 0,06$ (связь сильная) соответственно).

Ключевые слова: торфяник, физико-химические свойства, техногенные радионуклиды, Ненецкий автономный округ

VERTICAL DISTRIBUTION OF RADIONUCLIDES AND PHYSICO-CHEMICAL PARAMETERS IN THE PEAT OF THE NENETS AUTONOMOUS OKRUG

Lukoshkova A.A., Yakovlev E.Yu., Orlov A.S., Kudryavtseva A.A., Druzhinin S.V.

N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Ural branch of the Russian Academy of Science, Arkhangelsk, e-mail: a.luckoshkova@yandex.ru

The article presents the results of a study of the physicochemical properties and specific activity of radionuclides in a peat profile sampled on the territory of the Nenets Autonomous Okrug. The study of physicochemical parameters showed that in the peat profile there is a high ash content of up to 94%, due to the presence of alluvial sand, clay and minerals accumulated by plants. The proportion of organic matter reaches 89%. The mass fraction of carbonates in the profile is insignificant and varies in the range of 0.31–0.54%. The peat profile recorded the activity of radionuclides: ^{90}Sr (0.25–2.6 Bq/kg), ^{137}Cs (1.4–44 Bq/kg), ^{241}Am (0.39–2.7 Bq/kg), ^{210}Pb (4.0–382 Bq/kg). The activities of the studied radionuclides are below the established permissible standards according to NRB-99/2009 and do not pose a danger to biota and humans. Technogenic radionuclides are concentrated in the upper layers of the profile. ^{210}Pb is mainly localized in the uppermost layer (0–3 cm), significantly decreasing down the profile, reaching equilibrium with ^{226}Ra in the lower layers. The maximum activity of ^{210}Pb in the upper part of the profile is due to the arrival of the radionuclide in the form of aerosol fallouts with atmospheric precipitation. The isotopes ^{90}Sr and ^{137}Cs are localized in two layers of the profile and have a single vertical migration route. A positive correlation was found between the specific activities of ^{90}Sr and ^{137}Cs ($r = 0.87 \pm 0.06$, the relationship was strong). The specific activity of ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{241}Am , ^{210}Pb decreases with the depth of the profile. It was found that the highest values of the specific activity of ^{90}Sr and ^{137}Cs are observed with the highest proportion of organic matter ($r = 0.87 \pm 0.06$, strong bond). A negative correlation was found between ash content and specific activity of ^{90}Sr and ^{137}Cs ($r = 0.82 \pm 0.09$, (strong bond), $r = 0.87 \pm 0.06$ (strong bond), respectively).

Keywords: peatbog, physicochemical properties, technogenic radionuclides, Nenets autonomous okrug

Более 19% площади Ненецкого автономного округа занято болотами (~3,4 млн га) [1]. Преобладающим типом являются бедные питательными веществами верховые болота, основным источником питания которых являются аэрозоли, воздушная пыль и атмосферные осадки [2]. В связи с преобладающим атмосферным питанием,

верховые торфяники представляют собой огромный архив атмосферных загрязнителей, ведущую роль среди которых играют радиоактивные элементы, поскольку арктические территории, к которым относится Ненецкий автономный округ, с момента начала атомной эры подверглись существенному воздействию техногенной радиоак-

тивности [3, 4]. Основными источниками техногенной радиоактивности в Арктике являлись: а) глобальные (стратосферные) выпадения в результате атмосферных ядерных испытаний, б) локальные (тропосферные) выпадения в результате испытаний, проводимых на единственном в Арктике ядерном полигоне на Новой Земле с 1955 по 1990 г.; в) поступление в арктические моря техногенных радионуклидов от западноевропейских радиохимических заводов Великобритании и Франции; г) последствия Чернобыльской катастрофы 1986 г. [5].

Помимо техногенной радиоактивности, образованной преимущественно в результате глобальных выпадений от атмосферных испытаний атомного оружия и радиационных аварий, потенциальная опасность загрязнения торфяно-болотных экосистем округа может быть связана с естественными радионуклидами, источником которых являются многочисленные месторождения углеводородов на территории НАО. Естественные радионуклиды поступают на поверхность в составе минерализованных попутных вод, составляющих самый большой объем отходов в процессе добычи нефти и газа [6]. В связи с наличием в округе потенциальных радиационных источников, торфяно-болотные экосистемы, занимающие значительную площадь НАО, могут быть потенциальным концентратором радиоактивности, создавая опасность для биоты и человека. Кроме этого, радиоактивные

изотопы, находящиеся в торфяных отложениях, могут предоставить ценную информацию о последних региональных изменениях климатических условий и загрязняющих нагрузок [4]. Однако сведения об уровне загрязнения торфяников НАО радионуклидами техногенного и естественного происхождения отсутствуют. В связи с этим целью данной работы является исследование вертикального распределения радионуклидов атмосферных выпадений по профилю верхового болота на территории НАО. Для достижения указанной цели была отобрана колонка торфяных отложений в районе г. Нарьян-Мара, изучены физико-химические параметры и удельная активность следящих радионуклидов, имеющих большой период полураспада: стронций-90 (^{90}Sr) – 28,8 лет, цезий-137 (^{137}Cs) – 30,0 лет, америций-241 (^{241}Am) – 432,6 года, свинец-210 (^{210}Pb) – 22,2 года.

Материалы и методы исследования

Отбор торфяной колонки ТН 1-2 проводился согласно межгосударственному стандарту [7] в 18 км восточнее города Нарьян-Мар. Схема отбора колонки показана на рис. 1.

Глубина торфяной колонки составляла 29 см. После отбора колонка торфа была разделена на слои по 2 см, за исключением самого верхнего горизонта 0–3 см. В общей сложности торфяная колонка была разделена на 14 проб.



Рис. 1. Карта-схема отбора торфяной колонки ТН 1-2

В каждом из слоев торфа были определены физико-химические показатели: зольность (А) [8], массовая доля органического вещества (Х) гравиметрическим методом [9], массовая доля карбонатов ($C(CO_3^{2-})$) с учетом влажности и потерь при прокаливании; удельная активность радионуклидов ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{241}Am , ^{210}Pb .

Удельную активность ^{90}Sr в пробах торфа определяли бета-радиометрическим методом с радиохимической подготовкой согласно аттестованной методике [10]. Методика основана на измерении бета-излучения счетного образца, содержащего селективно выделенный из пробы иттрий-90 (^{90}Y), являющийся дочерним продуктом распада ^{90}Sr и находящийся с ним в радиоактивном равновесии в пробе, и расчете удельной активности ^{90}Y (^{90}Sr) в пробе. Измерение счетных образцов выполнялось с применением альфа-бета радиометра РСК-01А «Абелия» с программным обеспечением «Абелия 1.0.7.0».

Определение радионуклидов ^{137}Cs и ^{241}Am проводили с применением низкофонового гамма-спектрометра производства CANBERRA Packard с коаксиальным полупроводниковым детектором GX2018 на основе кристалла Ge(Li) и программного обеспечения Genie-2000. Удельную активность радионуклида ^{137}Cs фиксировали по линии гамма-излучения 661,7кэВ с квантовым выходом 89,9%, принадлежащей его дочернему радионуклиду ^{137}Ba , удельную активность радионуклида ^{241}Am – по линии гамма-излучения 59,5 кэВ с квантовым выходом 35,9%.

Удельную активность ^{210}Pb в пробах торфа определяли альфа-бета-радиометрическим методом с радиохимической подготовкой в соответствии с аттестованной методикой [11]. Сущность методики заключается в измерении бета-излучения счетного образца, содержащего изотоп висмута-210 (^{210}Bi), находящийся в радиоактивном равновесии с ^{210}Pb и селективно выделенный из пробы с использованием радиохимических приемов и спонтанного селективного электрохимического осаждения, и расчете удельной активности ^{210}Pb в пробе. Измерение счетных образцов выполнялось с применением альфа-бета радиометра РСК-01А «Абелия» с программным обеспечением «Абелия 1.0.7.0».

Для исследования структуры взаимосвязей изучаемых параметров использовали корреляционный анализ.

Результаты исследования и их обсуждение

Физико-химические показатели

Величина зольности для исследуемого торфяного профиля находится в интервале 11–94%. Согласно полученным данным (рис. 2), исследуемый профиль состоит из высокозольного торфа ($10\% < A < 50\%$, 1–8 слой) и заторфованного грунта ($A > 50\%$, 9–14 слой). Высокая зольность обусловлена наличием наносного песка, глины и минеральных веществ, накопленных растениями. Отмечается тенденция повышения зольности при движении вниз по профилю.

Обратный показатель зольности – доля органического вещества – уменьшается с глубиной (рис. 2). Массовая доля органического вещества в торфяном профиле варьирует по горизонтам в пределах от 5,9% до 89%. В слое 11–13 см наблюдается максимальное значение показателя.

Массовая доля карбонатов в торфяном профиле незначительна и находится в интервале 0,31–0,54%. В слое 0–3 см наблюдается максимальное значение показателя, возможно, обусловленное преимущественно атмосферным их поступлением. Для профиля характерно снижение массовой доли карбонатов с глубиной (рис. 2).

Удельная активность техногенных радионуклидов

Удельная активность ^{90}Sr в торфяном профиле составляет 0,25–2,6 Бк/кг, что не превышает установленную минимально значимую удельную активность (МЗУА) радионуклида (100 000 Бк/кг) [12]. Активность ^{90}Sr по профилю убывает с глубиной (рис. 3). Максимальная активность радионуклида отмечается в двух слоях: в слое 7–9 см (2,6 Бк/кг) и в слое 3–5 см (2,4 Бк/кг).

Удельная активность ^{137}Cs по торфяному профилю выше ^{90}Sr и находится в пределах от 1,4 до 44 Бк/кг. Активность радионуклида не превысила 0,01–0,44% от МЗУА (10 000 Бк/кг). Активность ^{137}Cs по торфяному профилю убывает с глубиной (рис. 3). Максимальная активность радионуклида отмечается в слое 5–7 см (44 Бк/кг) и слое 9–11 см (37 Бк/кг).

Малая активность ^{90}Sr и ^{137}Cs в самом первом слое 0–3 см профиля, возможно, обусловлена их повышенным переходом в растения. Накопление ^{90}Sr и ^{137}Cs моховым покровом подтверждается исследованием В.В. Гречкиной с соавторами [13].

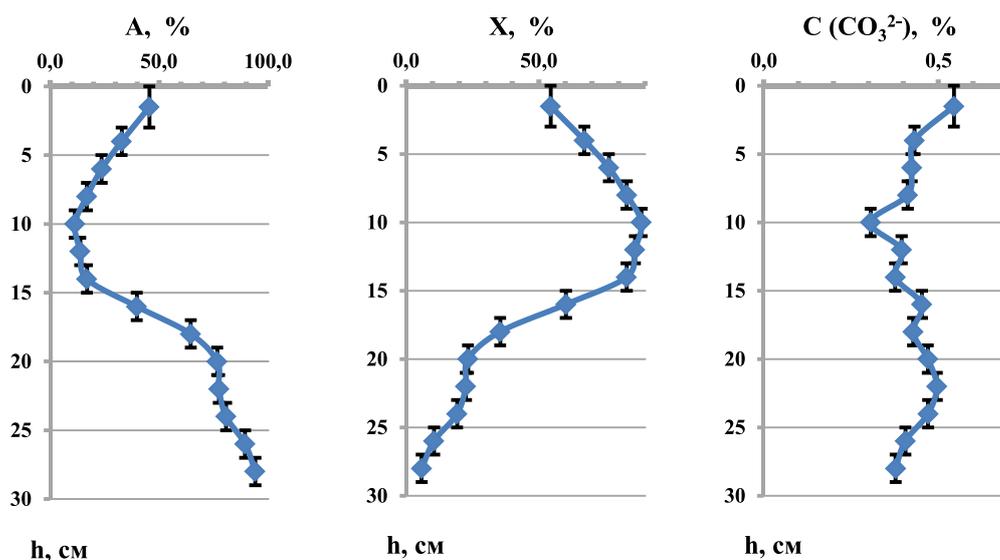


Рис. 2. Физико-химические свойства торфяного профиля ТН 1-2

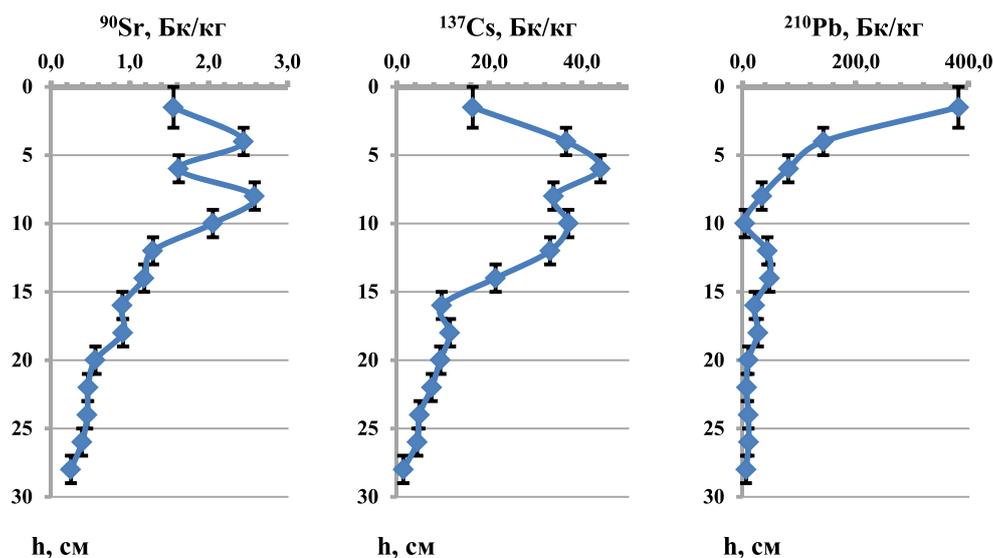


Рис. 3. Удельная активность радионуклидов в торфяном профиле ТН 1-2

Техногенные радионуклиды ^{90}Sr и ^{137}Cs имеют единый вертикальный миграционный путь по торфяному профилю: наблюдаются два пика их удельной активности. Между удельной активностью ^{90}Sr и ^{137}Cs выявлена положительная корреляционная зависимость ($r = 0,87 \pm 0,06$, связь сильная). Исследования Н.Н. Рахимовой и В.В. Делигировой [14], проведенные на черноземе, подтверждают выявленную закономерность.

Органическое вещество обуславливает удельную активность данных радионуклидов в торфе. Между долей органического вещества и удельной активностью ^{90}Sr и ^{137}Cs выявлена положительная корреляция ($r = 0,82 \pm 0,09$ (связь сильная), $r = 0,87 \pm 0,06$ (связь сильная) соответственно), при которой наибольшие значения удельной активности радионуклидов наблюдаются при наибольшей доле органического вещества (таблица).

Корреляционная зависимость активности радионуклидов от физико-химических показателей

| Радионуклид | Физико-химический показатель | | |
|-------------------|------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|
| | Зольность | Массовая доля органического вещества | Массовая доля карбонатов |
| ⁹⁰ Sr | -0,82 ± 0,09* | 0,82 ± 0,09* | -0,26 ± 0,25 |
| ¹³⁷ Cs | -0,87 ± 0,06* | 0,87 ± 0,06* | -0,40 ± 0,22 |
| ²¹⁰ Pb | -0,20 ± 0,26 | 0,20 ± 0,26 | 0,52 ± 0,19* |

Примечание: *достоверные значения на 1% и 5% уровне значимости.

Между зольностью – твердой неорганической частью торфа и удельной активностью ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs выявлена отрицательная корреляция ($r = -0,82 \pm 0,09$ (связь сильная), $r = -0,87 \pm 0,06$ (связь сильная) соответственно).

Удельная активность ²⁴¹Am обнаружена только в пяти слоях торфяного профиля в диапазоне от 0,39 до 2,7 Бк/кг. Значения активности не превысили 0,04–0,27% от МЗУА (1 000 Бк/кг). В остальных слоях активность ниже порога обнаружения. Пики удельной активности ²⁴¹Am в профиле не зафиксированы. Радионуклид по профилю распределяется равномерно.

Удельная активность ²¹⁰Pb выше активности ⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs и ²⁴¹Am и составляет 4,0–382 Бк/кг, что не превышает 0,04–3,8% от МЗУА (10 000 Бк/кг). Максимальная активность радионуклида (382 Бк/кг) зафиксирована в верхнем слое (0–3 см) торфяного профиля (рис. 3). Со слоя 3–5 см активность ²¹⁰Pb существенно убывает и выравнивается, достигая в нижних слоях равновесия с ²²⁶Ra. Максимум активности ²¹⁰Pb в верхней части профиля обусловлен поступлением радионуклида в виде аэрозольных выпадений с атмосферными осадками [15].

Заключение

В изученном торфяном профиле отмечена высокая зольность (до 94%), обусловленная наличием наносного песка, глины и минеральных веществ, накопленных растениями. Массовая доля органического вещества в торфяном профиле варьирует по горизонтам в пределах от 5,9% до 89%. Доля карбонатов в профиле незначительная (0,31–0,54%).

В торфяном профиле зафиксирована активность радионуклидов, которая снижается в ряду: ²¹⁰Pb → ¹³⁷Cs → ²⁴¹Am → ⁹⁰Sr. Изученные радионуклиды сосредоточены в верхних слоях торфяного профиля. Активность радионуклидов уменьшается с глубиной профиля. Изотопы ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs имеют

единый вертикальный миграционный путь по торфяному профилю.

Выявлена сильная положительная корреляция между долей органического вещества и удельной активностью ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs ($r = 0,82 \pm 0,09$, $r = 0,87 \pm 0,06$). Между удельной активностью ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs и зольностью соответственно наблюдается сильная отрицательная корреляция ($r = -0,82 \pm 0,09$, $r = -0,87 \pm 0,06$). Сравнение полученных данных с нормами радиационной безопасности (НРБ-99/2009) показало, что активности исследованных радионуклидов в торфе не превышают установленных значений и не представляют опасности для биоты и человека.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и БРФФИ в рамках научного проекта № 19-55-04001, а также гранта Президента РФ для молодых ученых № МК-1919.2020.5.

Список литературы / References

1. Доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Ненецкого автономного округа в 2020 году», г. Нарьян-Мар. Департамент природных ресурсов, экологии и агропромышленного комплекса Ненецкого автономного округа. 2021. [Электронный ресурс]. URL: <https://dprea.adm-nao.ru/ekologiya/doklady-o-sostoyanii-okruzhayushej-sredy-v-neneckom-avtonomnom-okruge/>. pdf (дата обращения: 18.10.2021).
2. Report «On the state and protection of the environment of the Nenets Autonomous Okrug in 2020». Naryan-Mar. Department of Natural Resources, Ecology and Agro-industrial Complex of the Nenets Autonomous Okrug. 2021. [Electronic resource]. URL: <https://dprea.adm-nao.ru/ekologiya/doklady-o-sostoyanii-okruzhayushej-sredy-v-neneckom-avtonomnom-okruge/>. pdf. (date of access: 18.10.2021) (in Russian).
3. Vinichuk M.M., Johanson K.J., Taylo, A. ¹³⁷Cs in the fungal compartments of Swedish forest soils. *Sci. Total Environ.* 2014. Vol. 323. P. 243–251.
4. Hansson S.V., Kaste J.M., Olid C., Bindler R. Incorporation of radiometric tracers in peat and implications for estimating accumulation rates. *Science of the Total Environment.* 2014. Vol. 493. P. 170–177.
5. Mroz T., Łokas E., Kocurek J., Gasiorek M. Atmospheric fallout radionuclides in peatland from Southern Poland *Journal of Environmental Radioactivity.* 2017. Vol. 175–176. P. 25–33.
6. Karcher M., Harms I., Standring W.J.F., Dowdall M., Strand P. On the potential for climate change impacts on marine anthropogenic radioactivity in the Arctic regions. *Marine Pollution Bulletin.* 2010. Vol. 60. P. 1151–1159.

6. Eriksen D.O., Sidhu R., Ramsøy T., Strålberg E., Iden K.I., Rye H., Hylland K., Ruus A., Berntssen M.H.G. Radioactivity in produced water from Norwegian oil and gas installations – concentrations, bioavailability, and doses to marine biota, *Radioprotect.*, 2009. Vol. 44. P. 869–874.
7. ГОСТ 17.4.3.01-2017. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб. М.: Стандартинформ, 2018. 8 с.
8. ГОСТ 27784-88. Почвы. Метод определения зольности торфяных и оторфованных горизонтов почв. М.: Издательство стандартов, 1988. 6 с.
9. ГОСТ 26213-91. Почвы. Методы определения органического вещества. М.: Издательство стандартов, 1992. 6 с.
10. Методика измерений удельной активности стронция-90 (^{90}Sr) в пробах почв, грунтов, донных отложений и горных пород бета-радиометрическим методом с радиохимической подготовкой. М.: ФГУП «ВИМС», 2013. 19 с.
- 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. M.: FGUP «VIMS», 2013. 19 p. (in Russian).
11. Методика измерений удельной активности полония-210 (^{210}Po) и свинца-210 (^{210}Pb) в пробах почв, грунтов, донных отложений, горных пород и строительных материалов на их основе альфа-бета-радиометрическим методом с радиохимической подготовкой. М.: ФГУП «ВИМС», 2013. 17 с.
- Methods for measuring the specific activity of polonium-210 (^{210}Po) and lead-210 (^{210}Pb) in samples of soils, grounds, bottom sediments, rocks and building materials based on them by the alpha-beta radiometric method with radiochemical preparation. M.: FGUP «VIMS», 2013. 17 p. (in Russian).
12. Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 07.07.2009 № 47 «Об утверждении СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)» [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902170553> (дата обращения: 18.10.2021).
- 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)» [Electronic resource]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902170553> (дата обращения: 18.10.2021) (in Russian).
13. Гречкина В.В., Лебедев С.В., Петруша Ю.К. Особенности аккумуляции радионуклидов наземными мхами на территории различных зон России // *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*. 2020. № 11–1(50). С. 13–16.
- Grechkina V.V., Lebedev S.V., Petrusheva Yu.K. Features of the accumulation of radionuclides by ground mosses on the territory of various zones of Russia // *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2020. № 11–1(50). P. 13–16 (in Russian).
14. Рахимова Н.Н., Делигинова В.В. Исследование профильной миграции радионуклидов цезия-137 и стронция-90 в различных типах почв // *Global science and innovations 2020: материалы Международной научной конференции (Ташкент, 06 марта 2020 г.)*. Ташкент: Издательство Евразийского центра инновационного развития «ДАРА», 2020. С. 113–118.
- Rakhimova N.N., Deligirova V.V. Study of the profile migration of cesium-137 and strontium-90 radionuclides in different types of soils // *Global science and innovations 2020: materials of the International Scientific Conference (Tashkent, March 06, 2020)*. Tashkent Izdatel'stvo Yevraziyskogo tsentra innovatsionnogo razvitiya «DARA», 2020. P. 113–118 (in Russian).
15. Бахур А.Е., Мануилова Л.И., Овсянникова Т.М. Po-210 и Pb-210 в объектах окружающей среды. Методы определения // *АНРИ*. 2009. № 1. С. 29–40.
- Bakhur A.E., Manuilova L.I., Ovsyannikova T.M. Po-210 and Pb-210 in environmental objects. Determination methods // *ANRI*. 2009. № 1. P. 29–40 (in Russian).