

УДК 504.054:550.424(470.11 + 470.22)

ЕСТЕСТВЕННАЯ И ТЕХНОГЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕР СЕВЕРО-ЗАПАДА РОССИИ (НА ПРИМЕРЕ РЕСПУБЛИКИ КАРЕЛИЯ И АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ)

¹Киселев Г.П., ¹Яковлев Е.Ю., ¹Дружинин С.В., ¹Киселева И.М.,
¹Баженов А.В., ²Быков В.М.

¹Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова Российской академии наук, Архангельск, e-mail: yakovlev_eu@inbox.ru;

²Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Архангельск, e-mail: v.m.bykov@narfu.ru

Естественная и техногенная радиоактивность выступает важнейшей составляющей, которая определяет состояние природной среды, поэтому знание механизмов накопления, путей миграции и распределения радионуклидов в компонентах экосистем приобретает особую актуальность. Актуальность оценки загрязнения компонентов окружающей среды радионуклидами на Северо-Западе России связана с наличием наземных и морских полигонов испытаний современного вооружения, мест захоронения токсичных отходов, действием силовых и энергетических ядерных установок, наличием атомного флота, разработкой месторождений углеводородного сырья, строительством заводов по его переработке. На радиационное состояние окружающей среды наряду с природными и антропогенными факторами большое влияние имеют трансграничные переносы загрязняющих компонентов воздушными и водными массами. Важным индикатором радиационного состояния окружающей среды являются донные отложения как носитель полной информации об истории развития водоемов. В связи с этим особую важность приобретает необходимость изучения активностей естественных и техногенных радионуклидов в донных осадках озер Северо-Запада России. В настоящей работе представлены результаты исследования техногенных и естественных радиоактивных элементов в донных отложениях ряда озер Архангельской области и Республики Карелия. Выявлено, что состав естественных радиоактивных изотопов донных отложений озер, не затронутых хозяйственной деятельностью, определяется преимущественно литологическим и гранулометрическим составом осадков, а также наличием органического вещества. Распределение техногенных радионуклидов подчиняется особенностям глобальных выпадений. Важным фактором в ускорении миграции естественных радионуклидов в окружающую среду и увеличению их активности в донных осадках является деятельность промышленных предприятий.

Ключевые слова: естественная и техногенная радиоактивность, донные отложения, техногенная нагрузка, цезий-137

NATURAL AND TECHNOGENIC RADIOACTIVITY IN BOTTOM SEDIMENTS OF LAKES OF THE NORTHWEST RUSSIA (THE EXAMPLE OF KARELIA REPUBLIC AND ARKHANGELSK REGION)

¹Kiselev G.P., ¹Yakovlev E.Yu., ¹Druzhinin S.V., ¹Kiseleva I.M., ¹Bazhenov A.V., ²Bykov V.M.

¹Federal Centre for Integrated Arctic Research, Arkhangelsk, e-mail: yakovlev_eu@inbox.ru;

²Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, e-mail: v.m.bykov@narfu.ru

Natural and technogenic radioactivity is the most important component that determining the state of environment, therefore, knowledge of mechanisms of accumulation, migration routes and distribution of radionuclides in ecosystem components is of particular relevance. Relevance of assessing the contamination of environmental components by radionuclides in the North-West of Russia is related to the availability of ground and sea testing ranges for modern weapons, toxic waste disposal sites, the operation of power and nuclear power plants, the availability of an atomic fleet, the development of hydrocarbon deposits, and the construction of a refinery. In addition to natural and anthropogenic factors, transboundary transport of polluting components by air and water masses is of great importance to the radiation state of the environment. Bottom sediments as a carrier of complete information on the history of the development of water bodies are an important indicator of the radiation state of the environment. In this connection, the necessity to study the activity of natural and technogenic radionuclides in the bottom sediments of the lakes of the North-West of Russia acquires particular importance. In the present work the results of research of technogenic and natural radioactive elements in bottom sediments of a number of lakes of the Arkhangelsk region and the Republic of Karelia are presented. It was revealed that the composition of natural radioactive isotopes of bottom sediments of lakes unaffected by economic activity is determined mainly by lithological and granulometric composition of precipitation, as well as by the presence of organic matter. The distribution of technogenic radionuclides obeys the features of global fallout. An important factor in accelerating the migration of natural radionuclides into the environment and increasing their activity in bottom sediments is the activity of industrial enterprises.

Keywords: natural and technogenic radioactivity, bottom sediments, technogenic load, cesium-137

Северо-Запад Российской Федерации в период ядерных испытаний на Новой Земле, испытаний в мировой практике, Чернобыльской аварии и аварии на АЭС

в Фокусиме, проведенный подземных ядерных взрывов в мирных целях, а также для устранения аварий при добыче нефти и газа подвергся существенному воздействию

техногенной радиоактивности. В этой связи необходимо проведение радиоэкологических исследований компонентов природной среды региона. Основным концентратором радионуклидов являются донные осадки, которые поглощают более 80 % радиоактивности [1]. Донные отложения озер – важный компонент озерной экосистемы – являются носителем полной информации истории развития водоемов [2] и служат накопителем вредных для здоровья населения элементов. В результате длительного накопления радионуклидов донные осадки могут стать источником вторичного радиоактивного загрязнения водных объектов и их постепенного распространения в компонентах окружающей среды, вовлечения в пищевые цепи и дополнительного облучения человека [3, 4].

В связи с особой актуальностью изучения радиоактивности в донных осадках нами были проведены исследования техногенных и естественных радиоактивных элементов в донных отложениях ряда озер Архангельской области и Республики Карелия. Исследования выполнены научным коллективом лаборатории экологической радиологии Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова Российской академии наук. В пределах Архангельской области были изучены 5 озер: Чидвозеро, Светлое, Святое, Лача и Холмовское. На территории Республики Карелия были опробованы 14 озер: Каменное, Космозеро, Нижнее Куйто, Среднее Куйто, Верхнее Куйто, Сегозеро, северная часть Онежского озера, а также ряд небольших озер примыкающих к крупнейшему в регионе горнодобывающему предприятию – Костомукшскому горно-обогатительному комбинату, эксплуатирующему одноименное месторождение железистых кварцитов (Костомукшское, Поппярви, Кенто, Ломо, Карянги, Окуновое, Ламбина-1 и Ламбина-2). Схема расположения опробованных озер показана на рис. 1.

Материалы и методы исследования

Представленные в работе материалы являются результатом исследований естественной и техногенной радиоактивности в донных осадках озер Архангельской области и Республики Карелия, которые проводились в течение 5 лет, с 2012 по 2016 гг. Из 19 исследованных озер было отобрано более 300 проб донных отложений, что позволило получить представительный массив данных.

Пробы донных отложений отбирались с моторной лодки ковшем-дночерпателем, места отбора

фиксировались GPS-навигатором, пробы помещались в пластиковые пакеты и маркировались, данные о пробах фиксировались в полевом журнале. В лабораторных условиях пробы высушивались до воздушно-сухого состояния, исследовался их гранулометрический состав, далее пробы высушивались в сушильном шкафу при температуре 105 °С до постоянной массы.

После взвешивания пробы донных осадков помещались в сосуд Маринелли для измерения активности радионуклидов методом гамма-спектрометрии. Регистрация гамма-излучений от счетного образца донных отложений, а также обработка спектров проводилась с использованием программно-аппаратурного комплекса «Прогресс-гамма» ФВКМ.412131.002-03 [5].

Калибровка гамма-спектрометра по энергии для контроля за сохранностью параметров установки проводилась после каждого измерения с использованием комбинированного контрольного источника ОИСН-137-1 в сосуде Маринелли – 1 литр. Обработка спектров, расчет значений активности и погрешности производились с использованием программного обеспечения ПРОГРЕСС.

Минимальное время экспонирования счетного образца составляло 3600 секунд. Однако в зависимости от активности пробы время экспонирования в отдельных образцах со слабой активностью увеличивалось.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты исследований естественной и техногенной радиоактивности в донных отложениях озер Республики Карелия и Архангельской области в обобщенном виде показаны в таблице. В таблице результаты измерений гамма-активности изотопов в пробах донных осадков рассчитаны как среднееарифметическое отдельно по каждому озеру. Пространственно сближенные небольшие озера на территории, примыкающей к Костомукшскому железорудному месторождению, рассматривались как единый объект. Наиболее наглядно особенности распределения радионуклидов отражены на рис. 2, где изученные объекты расположены в зависимости от географического положения – с запада на восток.

Характер распределения антропогенного изотопа цезия-137 в донных осадках исследуемых озер имеет ряд особенностей. В донных осадках озер Архангельской области активность цезия-137 изменяется в пределах от < 1 до 124 Бк/кг. Для озер Карелии характерен значительно более широкий разброс значений от < 1 до 873 Бк/кг. При этом просматривается зависимость изменения активности цезия от долготы, на которой находятся озера. Так, с продвижением на запад концентрация радиоцезия в донных отложениях зна-

чительно возрастает, достигая на долготе 30° в.д. – границе исследуемой площади близ государственной границы с Финляндией, максимальных величин. Данная зависимость выражается коэффициентом корреляции – 0,46. Вероятнее всего, такая закономерность объясняется особенностями глобальных выпадений радиоцезия в период испытаний ядерного оружия и аварии на Чернобыльской АЭС. Известно, что плотность отложения «чернобыльского» ^{137}Cs на северо-западе России более низкая, по сравнению с расположенными западнее Швецией и Финляндией. Плотность отложения ^{137}Cs на почвенный покров в Швеции составила до 85 кБк/м^2 , в Финляндии до 67 кБк/м^2 , в то время как на Кольском полуострове и в Карелии отложение ^{137}Cs было менее 10 кБк/м^2 [6].

^{226}Ra – щелочноземельный элемент, промежуточный продукт распада урана-238. Его кларк в земной коре составляет $36,8 \text{ Бк/кг}$, в почвах – 29 Бк/кг [7]. Средние значения активности ^{226}Ra в донных отложениях изученных озер Архангельской области не превышают кларковых значений. В отдельных пробах донных осадков фиксируется превышение кларка в среднем в два раза (Лача, Светлое). Схожая картина характерна и для некоторых Карельских озер, за исключением оз. Верхнее и Нижнее Куйто, а также небольших озер в районе Костомукшского железорудного месторождения, где отмечены значения $98, 134,7$ и $82,1 \text{ Бк/кг}$ соответственно. Кроме этого, существенное отклонение от среднего значения активности ^{226}Ra в донных осадках Онежского озера отмечено в Петрозаводской губе ($78,1 \text{ Бк/кг}$).

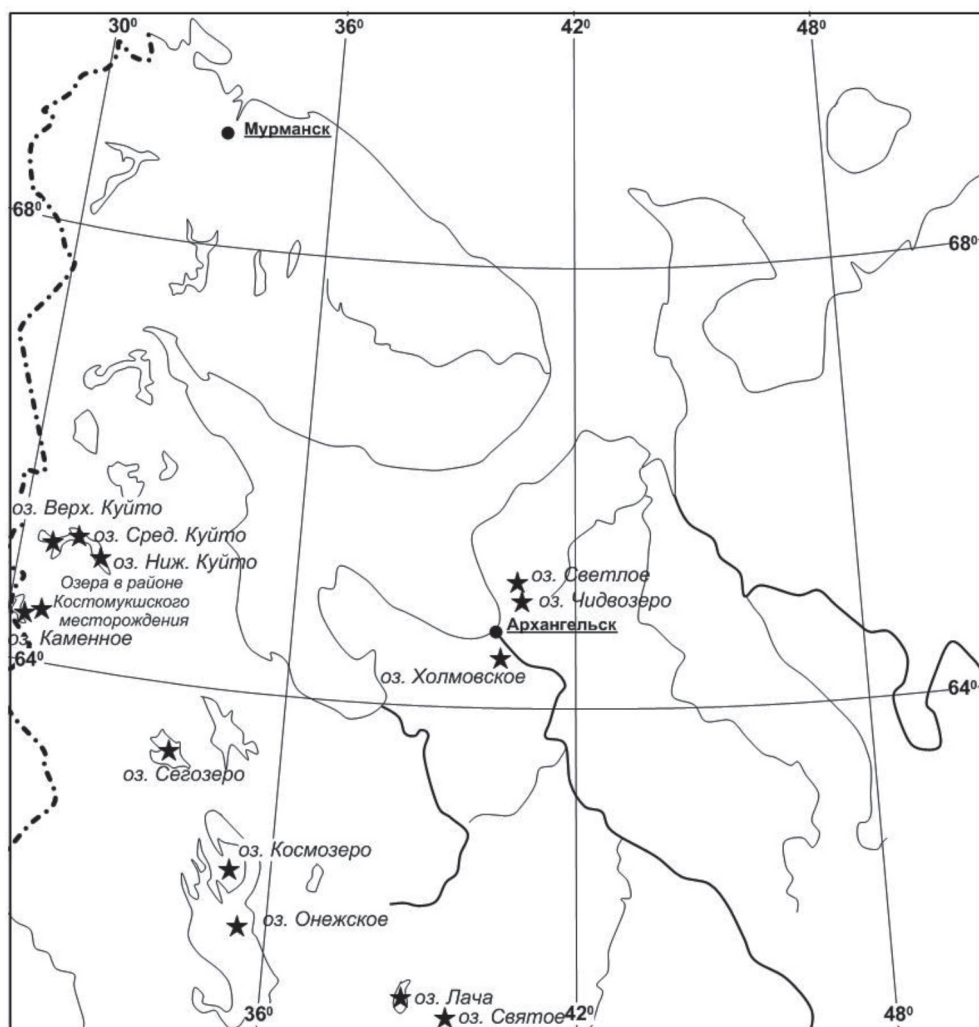


Рис. 1. Карта-схема расположения опробованных озер

Средние значения удельной активности радионуклидов в донных отложениях
исследованных озер

№ п/п	Название озера	Удельная активность изотопов, Бк/кг			
		¹³⁷ Cs	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
Республика Карелия					
1	Озера в районе Костомукшского железородного месторождения	<u>179,7</u> 1–547,7	<u>38,7</u> 4,8–82,1	<u>27,6</u> 4,9–83,8	<u>366,8</u> 16–890
2	оз. Каменное	<u>86,7</u> 10–873	<u>16,3</u> 2–76	<u>16,2</u> 1–45	<u>230,9</u> 27,9–624
3	оз. Верхнее Куйто	<u>41,9</u> 6,9–85,5	<u>25,4</u> 4,3–98	<u>22,9</u> 12,9–36,3	<u>366,6</u> 205,3–539
4	оз. Среднее Куйто	<u>25,4</u> 11–54,9	<u>24,53</u> 5,4–134,7	<u>24,9</u> 18,4–29,6	<u>435</u> 300–500
5	оз. Нижнее Куйто	<u>25,1</u> 6,6–50,8	<u>11,7</u> 6,4–16,9	<u>18,6</u> 6,1–41,1	<u>427,9</u> 312,6–545
6	оз. Сегозеро	<u>30,6</u> 3,9–81,6	<u>18,1</u> 8,5–35,5	<u>22,1</u> 9,3–51,4	<u>492,8</u> 339–836
7	оз. Космозеро	<u>10,3</u> 1–36	<u>13,8</u> 2–50,5	<u>26,1</u> 7–41	<u>377,4</u> 82–546
8	оз. Онежское	<u>29,9</u> 1,3–92,8	<u>15,6</u> 4,5–78,1	<u>23,8</u> 4–42,8	<u>453,2</u> 225–646
Архангельская область					
9	оз. Лача	<u>38,7</u> 1,4–71	<u>25,3</u> 12,5–49,6	<u>24,8</u> 13,4–30,6	<u>407,2</u> 334–471
10	оз. Святое	<u>34,2</u> 0,6–111,7	<u>19,2</u> 2,7–52,6	<u>31,7</u> 12,3–54,9	<u>424,8</u> 226,9–599
11	оз. Холмовское	<u>23,0</u> 2,1–71	<u>13,7</u> 4,4–24,3	<u>20,1</u> 5,5–32,6	<u>530,7</u> 404,4–663
12	оз. Чидвозеро	<u>37,8</u> 2,1–124	<u>24,4</u> 8,2–45,8	<u>23,0</u> 8,5–34,2	<u>368,6</u> 137–647
13	оз. Светлое	<u>4,6</u> 1–9,1	<u>21,7</u> 7,2–67,2	<u>14,4</u> 1,3–39,2	<u>151,7</u> 30–287,6

Примечание. Над чертой – средние значения, под чертой – минимальные и максимальные значения.

Кларк ²³²Th в почве составляет 24,6 Бк/кг, для осадочных пород эта величина составляет 45 Бк/кг. Средние значения активности тория в донных осадках озер Карелии и Архангельской области находятся на уровне кларковых для почв, которые являются основным источником тория в донных отложениях. В отдельных пробах удельная активность тория повышена, но, как правило, не превышает 45 Бк/кг, типичных для осадочных пород. Исключение составляют озера вблизи Костомукшского горно-обогатительного комбината – оз. Окуновое и Поппиярви (до 83,8 Бк/кг).

Кларковое значение ⁴⁰K в земной коре составляет 655 Бк/кг, кларк для почвы – 370 Бк/кг. В донных отложениях всех исследованных озер средние значения активности ⁴⁰K не превышают кларковых для земной коры. В отдельных пробах удельная

активность ⁴⁰K также ниже кларка или близка к нему. Превышение кларковой величины выявлено в пробе, отобранной из оз. Сегозеро (836 Бк/кг), представляющей собой пелит с большим количеством крупных включений обломков коренных пород с высоким содержанием природного калия. Еще больше превышение кларковых значений калия-40 было выявлено в нескольких пробах донных отложений в озерах района Костомукшского месторождения железистых кварцитов (до 890 Бк/кг). Судя по всему, источник калия в донных осадках озер, примыкающих к Костомукшскому ГОКу – это наличие в разрабатываемых карьерах гранито-гнейсов, для которых концентрация калия составляет около 1000 Бк/кг.

Относительно форм нахождения радионуклидов в донных осадках можно судить по степени связи между изотопами. Так,

корреляционная связь между ^{232}Th и ^{40}K характеризуется как умеренная положительная связь. Это объясняется тем, что данные радионуклиды преимущественно связаны с минеральной литогенной частью донных осадков. Связь активности радия с данными изотопами более слабая, что говорит о том, что радий, имея высокую миграционную активность, в большей степени связан с хемогенной и органической фракциями осадков и в меньшей степени с минеральной частью.

Между радиоцезием и торием, радиоцезием и калием зависимости не наблюдается, в то время как связь ^{137}Cs и ^{226}Ra выражается коэффициентом корреляции 0,71 и характеризуется как сильная положительная. Это говорит о том, что радионуклиды ^{137}Cs и ^{226}Ra концентрируются в одних и тех же фракциях донных отложений.

Значения активности естественных радиоактивных элементов в донных отложениях озер, не затронутых хозяйственной деятельностью человека, обусловлены активностью радионуклидов в почвах и коренных породах, уровнем континентального смыва и выносом из рек с обломочным материалом с последующим осаждением на дно. Однако с увеличением степени техногенной нагрузки на озера состав активности естественных радионуклидов существенно

изменяется в сторону увеличения. Ярким примером в данном случае служат донные осадки озер, примыкающих к Костомукшскому ГОКу. Сброс пульпы, обогащенной радионуклидами коренных пород (гранито-гнейсов), из обогащательной фабрики приводит к существенному увеличению концентраций тория и калия в донных осадках.

Выводы

Изложенные в работе результаты исследований позволяют сделать следующие выводы.

Характер распределения цезия-137 в донных осадках подчиняется географическому положению исследованных озер. Так при продвижении на запад активность радиоцезия существенно возрастает, достигая близ границы с Финляндией (оз. Каменное) максимальных значений. Такая закономерность объясняется особенностями глобальных выпадений цезия в период испытаний ядерного оружия и аварии на Чернобыльской АЭС.

В целом средние значения активностей естественных радионуклидов в исследованных озерах Карелии и Архангельской области находятся на уровне кларковых. Флуктуации активности естественных радионуклидов главным образом зависят от литологического и гранулометрического состава осадков, а также от наличия органического вещества.

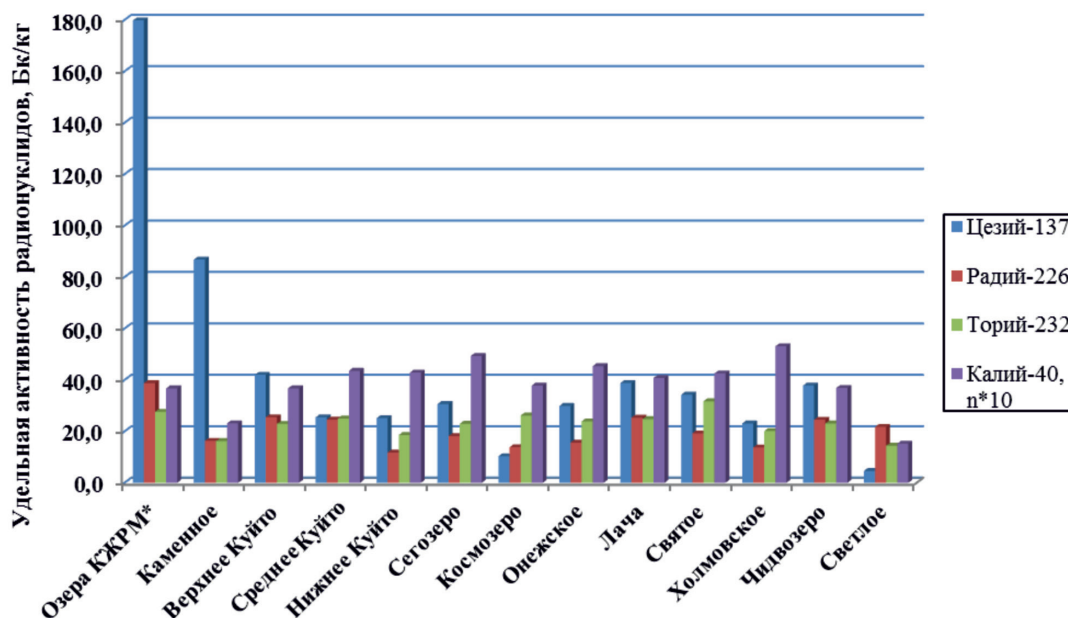


Рис. 2. Средние значения удельной активности ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K в донных осадках озер Архангельской области и Республики Карелия. Примечание. *Небольшие озера в районе Костомукшского железорудного месторождения (Поппярви, Кенто, Ломо, Карянги, Окуновое, Ламбина-1 и Ламбина-2)

С увеличением степени техногенной нагрузки на озера под влиянием промышленных и горнодобывающих предприятий существенно ускоряется миграционная активность радионуклидов в компоненты природной среды, что отражается на составе радиоактивных изотопов донных отложений.

Работа выполнена при поддержке проекта УрО РАН № 15-15-5-48 и Гранта РФФИ № 16-35-00153 мол_а.

Список литературы

1. Трапезников А.В. Миграция радионуклидов в пресноводных экосистемах / И.В. Молчанова, Е.Н. Караваева. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2007. – 480 с.
2. Субетто Д.А. Донные отложения озер: палеолимнологические реконструкции / Д.А. Субетто. – СПб.: РГПУ им. А.И. Герцена, 2009. – 344 с.
3. Мухаметшина Л.Ф. Содержание радионуклидов в воде и донных отложениях озер Восточно-Уральского радиоактивного следа: автореф. дис. ... канд. биол. наук. – Москва, 2011. – 25 с.
4. Павлоцкая Ф.И. Формы нахождения радионуклидов в воде и донных отложениях некоторых промышленных водоемов ПО «Маяк» / Ф.И. Павлоцкая // Радиохимия. – 1998. – № 5. – С. 462–467.
5. Методика измерения активности радионуклидов с использованием сцинтилляционного гамма-спектрометра с программным обеспечением «Прогресс» (утверждена начальником ЦМФИ ГНМЦ «ВНИИФТРИ» Ярыной В.П. 07.05.1996). – М.: Изд-во НТЦ «Амплитуда», 2016. – 12 с.

6. Бакунов Н.А. К вопросу устойчивости пресноводных водоемов Восточной Фенноскандии к отложению ^{137}Cs : радиологический аспект / Н.А. Бакунов, Л.М. Саватюгин // Арктика: экология и экономика. – 2013. – № 1(9). – С. 24–35.

7. Смыслов А.А. Тепловой режим и радиоактивность Земли / У.И. Моисеенко, Т.З. Чадович. – Л.: Недра, 1979. – 345 с.

References

1. Trapeznikov A.V. Migracija radionuklidov v presnovodnyh ekosistemah / I.V. Molchanova, E.N. Karavaeva. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2007. 480 p.
2. Subetto D.A. Donnye otlozhenija ozer: paleolimnologicheskie rekonstrukcii / D.A. Subetto. SPb.: RGPU im. A.I. Gercena, 2009. 344 p.
3. Muhametshina L.F. Soderzhanie radionuklidov v vode i donnyh otlozhenijah ozer Vostochno-Uralskogo radioaktivnogo sleda: avtoref. dis. ... kand. biol. nauk. Moskva, 2011. 25 p.
4. Pavlockaja F.I. Formy nahozhdenija radionuklidov v vode i donnyh otlozhenijah nekotoryh promyshlennyh vodoevov PO «Majak» / F.I. Pavlockaja // Radiokhimiya. 1998. no. 5. pp. 462–467.
5. Metodika izmerenija aktivnosti radionuklidov s ispolzovaniem scintilljacionnogo gamma-spektrometra s programmym obespecheniem «Progress» (utverzhdjena nachalnikom CMII GNMC «VNIIFTRI» Jarynoj V.P. 07.05.1996). M.: Izd-vo NTC «Amplituda», 2016. 12 p.
6. Bakunov N.A. K voprosu ustojchivosti presnovodnyh vodoemov Vostochnoj Fennoskandii k otlozheniju ^{137}Cs : radiologicheskij aspekt / N.A. Bakunov, L.M. Savatjugin // Arktika: jekologija i jekonomika. 2013. no. 1(9). pp. 24–35.
7. Smyslov A.A. Teplovoj rezhim i radioaktivnost Zemli / U.I. Moiseenko, T.Z. Chadovich. L.: Nedra, 1979. 345 p.