Научная статья
УДК 504.4.054
https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-380-391

Содержание искусственных и естественных радионуклидов в донных отложениях водных объектов юго-западной части Алтайского края

Оксана Юрьевна Коровина[a], Владимир Александрович Сомин[b], Альмира Курмановна Айдарханова[c], Лариса Федоровна Комарова[d]
[a,b,d]*Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, г. Барнаул, Россия*
[c]*Институт радиационной безопасности и экологии, г. Курчатов, Республика Казахстан*
Автор, ответственный за переписку: Сомин Владимир Александрович, vladimir_somin@mail.ru

Резюме. Целью представленного исследования являлось изучение и анализ экологического состояния малых водотоков и водоемов юго-западной части Алтайского края (Россия), которые ранее подвергались радиационному воздействию в результате ядерных испытаний, проходивших на Семипалатинском полигоне. В ходе работы авторами получены результаты исследований содержания искусственных и естественных радионуклидов в донных отложениях рассматриваемых водных объектов. Отбор образцов донных отложений и их аналитические исследования были выполнены в 2020–2022 гг. При отборе проб проведены замеры мощности дозы гамма-излучения донных отложений. После их подготовки (высушивания, измельчения) выполнены измерения плотности потока альфа- и бета-частиц от поверхности. Лабораторные исследования образцов осуществлены с использованием высокочувствительного аналитического оборудования: гамма-спектрометра ORTEC GEM25P4-70, альфа-спектрометра Alpha Analyst A1200-32AM CANBERRA, бета-спектрометра TRI-CARB 3110TR PerkinElmer. В донных отложениях определены активности естественных (калия-40, тория-232, радия-226) и искусственных (америция-241, плутония-239+240, цезия-137 и стронция-90) радионуклидов. В результате исследований установлено, что радиационные параметры донных отложений водных объектов юго-западной части Алтайского края не превышают нормативного уровня, остатки следов ядерных испытаний, проходивших на испытательном полигоне, в исследуемых водных объектах в настоящее время не обнаружены.

Ключевые слова: искусственные и естественные радионуклиды, поверхностные воды, донные отложения, юго-западная часть Алтайского края

Благодарности: Авторы выражают благодарность директору Института радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра Республики Казахстан А. О. Айдарханову и его сотрудникам Л. В. Тимоновой, Н. В. Захаровой, Г. А. Коваленко, Г. Ы. Досмамбетовой за сотрудничество и профессионализм при выполнении аналитических исследований в соответствии с поставленными задачами.

Для цитирования: Коровина О. Ю., Сомин В. А., Айдарханова А. К., Комарова Л. Ф. Содержание искусственных и естественных радионуклидов в донных отложениях водных объектов юго-западной части Алтайского края // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 4. С. 380–391. https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-380-391.

Original article

The concentrations of artificial and natural radionuclides in the bottom sediments of south-west Altai territory water bodies

Oksana Yu. Korovina[a], Vladimir A. Somin[b], Almira K. Aidarkhanova[c], Larisa F. Komarova[d]
[a,b,d]*Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia*
[c]*Institute of Radiation Safety and Ecology, Kurchatov, Republic of Kazakhstan*
Corresponding author: Vladimir A. Somin, vladimir_somin@mail.ru

Abstract. The purpose of the research is to study and analyze the environmental condition of small streams and reservoirs in the southwestern part of the Altai Territory (Russia), which were previously exposed to radiation as a result of nuclear tests at the Semipalatinsk test site. Conducting the research, the authors obtained the results of studying the content of artificial and natural radionuclides in the bottom sediments of the water bodies under investigation. Sampling of bottom sediments and their analytical studies were carried out in 2020–2022. The sampling involved measurements of the dose

© Коровина О. Ю., Сомин В. А., Айдарханова А. К., Комарова Л. Ф., 2022

rate of bottom sediment gamma radiation. Having dried and ground the samples, the authors measured the flux density of alpha and beta particles from the surface. Laboratory studies of the samples were carried out using highly sensitive analytical equipment including an ORTEC GEM25P4-70 gamma spectrometer, an Alpha Analyst A1200-32AM CANBERRA alpha spectrometer, and a TRI-CARB 3110TR PerkinElmer beta spectrometer. The activities of natural radionuclides (potassium-40, thorium-232, radium-226) and artificial radionuclides (americium-241, plutonium-239+240, cesium-137 and strontium-90) were identified in the bottom sediments. It was determined that the radiation parameters of bottom sediments of water bodies in the southwestern part of the Altai Territory do not exceed the standard level, and the remains of traces of nuclear tests that took place at the test site are not found in the studied water bodies today.

Keywords: artificial and natural radionuclides, surface waters, bottom sediments, southwestern part of the Altai Territory

Acknowledgements: The authors express their gratitude to A. O. Aidarkhanov, the Director of the Institute of Radiation Safety and Ecology of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, and his colleagues L. V. Timonova, N. V. Zakharova, G. A. Kovalenko, G. Y. Dosmambetova for cooperation and professionalism in carrying out analytical studies in accordance with the tasks set.

For citation: Korovina O. Yu., Somin V. A., Aidarkhanova A. K., Komarova L. F. The concentrations of artificial and natural radionuclides in the bottom sediments of south-west Altai territory water bodies. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use.* 2022;45(4):380-391. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-380-391.

Введение

Территория юго-западной части Алтайского края с 50-х и до конца 80-х гг. прошлого столетия подвергалась различного рода техногенным воздействиям, в результате чего сформировалась существующая в настоящее время неблагоприятная экологическая ситуация. Экологический мониторинг на территории края в основном выполняет Алтайский центр гидрометеорологической службы. По данным исследований центра, основной вклад в загрязнение поверхностных вод объектов Алтайского края вносят нефтепродукты, фенолы, фосфаты, общее железо, медь, аммонийный и нитритный азот, трудно- и легкоокисляемая органика (по химическому потреблению кислорода и биохимическому потреблению кислорода на основе анализа, проводимого в течение 5 суток) [1].

Анализ имеющихся современных данных по экологической ситуации юго-западной части Алтайского края показал, что в настоящее время не проводятся исследования окружающей среды на содержание радионуклидов, которые попали на территорию края в ходе проведения ядерных испытаний на Семипалатинском испытательном ядерном полигоне и которые могут до сих пор присутствовать в окружающей среде, создавая опасность для населения и природных объектов. Основные исследования последствий радиационного воздействия на территорию и население Алтайского края в настоящее время связаны с реконструкцией и расчетом полученных доз облучения населения края, а также медицинскими исследованиями лиц, пострадавших от ядерных испытаний, и их потомков [2].

По опубликованным данным ученых Национального ядерного центра Республики Казахстан [3], в сторону Российской Федерации уходят основные следы радиоактивных выпадений от ядерных испытаний 1949 и 1953 гг. Радиоактивному загрязнению от испытаний 29 августа 1949 г. подверглись несколько районов Алтайского края и Республики Алтай. След от испытаний 12 августа 1953 г. затронул территорию юга Алтайского края, части Новосибирской и Кемеровской областей (рис. 1).

По данным Распоряжения Правительства Российской Федерации № 162-Р от 10 февраля 1994 г., часть населенных пунктов Локтевского, Рубцовского, Змеиногорского, Краснощековского, Курьинского, Поспелихинского и Угловского районов Алтайского края попала в зону, в которой вследствие ядерного испытания 29 августа 1949 г. население получило суммарную эффективную дозу облучения от 50 до более 250 мЗв при норме годовой дозы облучения для населения 1 мЗв в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв в год[1].

[1] О перечне населенных пунктов Алтайского края, подвергшихся радиационному воздействию ядерных испытаний на Семипалатинском полигоне (с изменениями на 8 февраля 2002 года): распоряжение Правительства Российской Федерации № 162-р от 10 февраля 1994 г. [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/9007771 (27.04.2022).

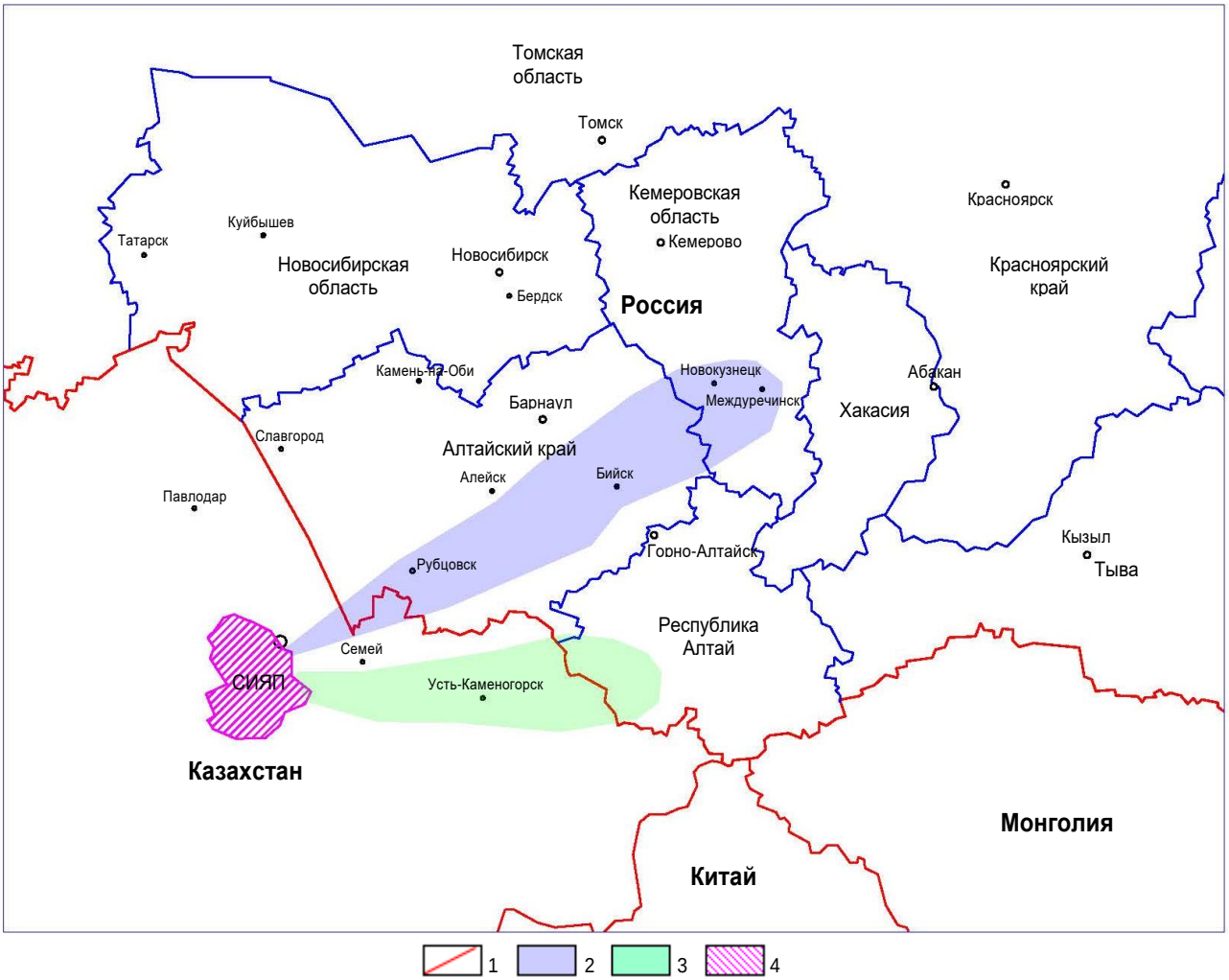

Рис. 1. Схема следов радиоактивных выпадений от испытаний 1949 и 1953 гг.:
1 – государственная граница; 2 – радиоактивный след 1953 г.; 3 – радиоактивный след 1949 г.;
4 – Семипалатинский испытательный ядерный полигон
Fig. 1. Diagram of traces of radioactive fallouts resulting from tests in 1949 and 1953:
1 – state border; 2 – radioactive trace of 1953; 3 – radioactive trace of 1949;
4 – Semipalatinsk nuclear test site

Изучением радиационной обстановки в Алтайском крае занимались многие исследователи – как в период проведения испытаний на Семипалатинском полигоне, так и после его закрытия[2]. В 1999 г. были опубликованы исследования радиационного воздействия на население Алтайского края, выполненные Я. Н. Шойхетом и его коллегами [4].

Имеются интересные результаты реконструкции следов радиоактивного загрязнения, полученные В. Ф. Рапутой и Т. В. Ярославцевой [5]. Путем математического моделирования эти исследователи выполнили численную реконструкцию следов взрывов 29 августа 1949 г. и 12 августа 1953 г. В ходе анализа из приведенных наиболее значимых следов за пределами территории Семипалатинского полигона видно, что масштабы радиоактивного загрязнения после термоядерного взрыва в 1953 г. были максимальными по сравнению с теми, которые наблюдались после взрывов в предыдущие и последующие годы. Плотность загрязнения радиоактивным нуклидом ^{137}Cs территории Алтайского края по материалам ряда исследователей составляла от 15 до 175 мКи/км^2 [6, 7].

В настоящее время радиационный фон территории, попавшей под след радиоактив-

[2] Азаев Ю. Л. Радиационно-гигиеническая обстановка в предгорьях Алтая и ее оптимизация на курорте Белокуриха: автореф. дисс. … кандид. мед. наук: 14.00.07. Кемерово, 1997. 22 с.

ных выпадений, соответствует нормативному уровню. С момента закрытия испытательного полигона произошли естественные процессы восстановления экосистемы путем миграции радионуклидов с поверхности в грунт, их радиоактивного распада, а также перемещения по цепочке «окружающая среда – растения – животные – человек».

По данным исследований И. Б. Колядо [7], особенность формирования доз облучения населения Алтайского края в результате ядерных испытаний заключается в том, что подавляющая часть дозы формировалась короткоживущими радионуклидами. В результате этого 80 % дозы реализовалось в течение первой недели после радиационного воздействия (взрыва). Данный вид облучения населения рассматривается как преимущественно острый, при котором биологическое действие ионизирующего излучения выше, чем при хроническом облучении. Таким образом, И. Б. Колядо делает вывод: на основании многолетних научных исследований было дано заключение о том, что на Алтае в настоящее время есть люди, пострадавшие от радиационного воздействия, главным образом от влияния испытаний ядерного оружия, но нет загрязненных территорий, то есть нет никаких ограничений для проживания людей и землепользования.

По нашему мнению, в настоящее время интерес для ретроспективной оценки радиационной обстановки территории, попавшей под следы радиоактивных выпадений, могут представлять донные отложения водоемов, так как процессы миграции радионуклидов в них менее интенсивны, а их содержание, в свою очередь, может представлять опасность для животного мира и человека.

Для изучаемого региона подобные исследования ранее не проводились. Имеются материалы исследований для регионов, в которых развита атомная промышленность и загрязнение водоемов радионуклидами возможно в результате сбросов от атомных предприятий и радиационных аварий (Красноярский край, Южный Урал) [8–11]. По сведениям А. И. Смагина[3] [12], в пресноводных водоемах наблюдается сорбция большинства радионуклидов придонными взвесями и грунтами. Способность донных отложений в значительной степени накапливать радиоактивные вещества обуславливает резкое уменьшение их концентрации с увеличением глубины грунтов и их особенно высокую концентрацию в верхних слоях на границе воды и ила.

Имеются результаты исследований ученых из Республики Казахстан по водным объектам, находящимся на территории бывшего Семипалатинского полигона и подвергшимся максимальному воздействию при проведении на полигоне испытаний [13]. По данным работы А. К. Айдархановой [14], исследования воды и донных отложений водных объектов Семипалатинского испытательного полигона показали, что основное количество радионуклидов сконцентрировано в донных отложениях. Коэффициенты распределения радионуклидов (отношение содержания удельной активности радионуклида в донных отложениях к содержанию удельной активности в воде) для $^{239+240}$Pu составляют примерно от $1{,}5\cdot10^{7}$ до $2{,}8\cdot10^{5}$, для ^{137}Cs – от $3{,}3\cdot10^{5}$ до $2{,}3\cdot10^{3}$, для ^{90}Sr – от $1{,}6\cdot10^{5}$ до $1{,}1\cdot10^{2}$. Таким образом, исследователи сделали выводы, что состояние донных отложений является наиболее информативным показателем при радиоэкологической оценке водного объекта. Результаты исследований донных отложений позволяют установить наиболее неблагополучные в радиационном отношении водоемы и водотоки, а также в конечном счете скорректировать состав и объем исследований радиоэкологического состояния водных объектов.

По материалам исследований сотрудников Института радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра Республики Казахстан [14], концентрация техногенных радионуклидов в донных отложениях большинства природных озер, расположенных в границах бывшего Семипалатинского полигона, в среднем достигает 200 Бк/кг ^{137}Cs, 20 Бк/кг ^{241}Am, ^{90}Sr и $^{239+240}$Pu. Для ^{241}Am и ^{137}Cs коэффициент распределения не рассчитан, так как их численные значения содер-

[3] Смагин А. И. Экология водоемов зоны техногенной радиационной аномалии на Южном Урале: автор. дисс. … д-ра биол. наук: 03.00.16. Пермь, 2008. 50 с.

жания в воде озер не зафиксированы. Для ^{90}Sr коэффициент распределения изменяется от $n\cdot10^0$ до $n\cdot10^3$, для $^{239+240}$Pu – от $n\cdot10^1$ до $n\cdot10^6$. Из этого следует, что в системе «донные отложения – вода» природных озер ^{90}Sr в сопоставимых количествах содержится как в воде, так и в донных отложениях в случае, где коэффициент распределения равен $n\cdot10^0$, а $^{239+240}$Pu преимущественно сосредоточен в донных отложениях.

Содержание ^{241}Am в растениях природных озер находится ниже предела обнаружения используемого аппаратурно-методического обеспечения и составляет менее 0,5 Бк/кг. Содержание ^{137}Cs во всех растениях в среднем достигает (17 ± 1) Бк/кг, максимальное значение (80 ± 8) Бк/кг зафиксировано в солеросе, произрастающем на озере на следе 1951 г. Содержание ^{90}Sr в среднем достигает (60 ± 10) Бк/кг, максимальное значение (440 ± 40) Бк/кг зафиксировано в солеросе, отобранном на Внешнем водоеме «Атомного» озера. Содержание $^{239+240}$Pu в среднем достигает (2 ± 0,5) Бк/кг, максимальное значение (7,4 ± 2,1) Бк/кг зафиксировано в солеросе, произрастающем на оз. Жингылды, расположенном в зоне влияния площадки «Сары-Узень».

Необходимо отметить, что исследования по изучению радиоактивности объектов окружающей среды проводились не только в зоне влияния Семипалатинского ядерного полигона. В частности, А. В. Трапезников в своей работе [15] описал распределение радионуклидов по основным компонентам оз. Червяного, которое в 1957 г. было загрязнено ^{137}Cs и ^{90}Sr в результате крупнейшей радиационной аварии на ПО «Маяк». Исследования проводились в несколько этапов. Объектами его являлись вода, донные отложения, водная растительность и озерная рыба. Данная работа характеризует динамику изменения радиоактивности в объектах окружающей среды озера за период наблюдений с 1957 по 2001 г. с ретроспективной оценкой до 2057 г. По результатам исследований к 2001 г. вода в оз. Червяном соответствовала нормам для питьевой воды и могла использоваться в различных хозяйственных целях. В растительности, донных отложениях и рыбе произошло снижение активности по ^{137}Cs и ^{90}Sr, однако уровни остались высокими.

В статье [16] А. В. Коржавин и его коллеги из Института экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук представили сравнительный анализ накопления ^{137}Cs и ^{90}Sr на различных участках Обь-Иртышской речной системы. Показано, что удельные запасы ^{90}Sr увеличиваются в донных отложениях р. Течи на водотоке, в то время как для ^{137}Cs отмечается их существенное снижение. Удельные запасы обоих радионуклидов в донных отложениях на нижележащих участках речной системы «Тобол – Иртыш» монотонно уменьшаются по течению, в то же время запасы ^{90}Sr преобладают над запасами ^{137}Cs.

В своих статьях по Крыму [17–19] А. А. Параскив, Н. Н. Терещенко, А. В. Трапезников и другие авторы представили результаты исследований озер на содержание изотопов $^{239+240}$Pu в донных отложениях. Основным источником загрязнения озер являлись глобальные радиоактивные выпадения и авария на Чернобыльской атомной электростанции. Сделанные в результате исследований выводы представляют интерес, так как свидетельствуют о том, что плотность выпадений радионуклидов плутония от глобальных испытаний гораздо выше, чем в результате чернобыльской аварии.

На основании вышеизложенного определено, что в настоящее время для Алтайского края является важным изучить уровень радиоактивности донных отложений водных объектов, попавших под след радиоактивных выпадений от Семипалатинского полигона, с целью оценки риска радиационной опасности для местного населения при использовании природных водных объектов.

Материалы и методы исследований

Настоящие исследования посвящены изучению и анализу экологического состояния малых водотоков и водоемов юго-западной части Алтайского края, которые ранее подвергались радиационному воздействию со стороны Семипалатинского испытательного ядерного полигона.

В работе применялись современные аналитические методы, позволяющие получить корректные данные по содержанию в объектах окружающей среды естественных и искусственных радионуклидов. Подготовка образцов выполнена в лаборатории Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова (г. Барнаул, Россия). Аналитические исследования проведены в Лаборатории радиационных исследований Института радиационной безопасности и экологии (г. Курчатов, Казахстан).

Исследования донных отложений водных объектов юго-западной части Алтайского края на содержание естественных и искусственных радионуклидов выполнены в 2020–2022 гг.

Объектами исследований являются малые водотоки и озера юго-запада Алтайского края (р. Никитиха, Крутишка и Корболиха, оз. Горькое, Новоегорьевское, Малиновое, Большое Угловское). Результаты исследований р. Никитихи, Крутишки и Корболихи, восточной стороны оз. Горького и Новоегорьевского были получены в 2021 г. и опубликованы авторами в 2022 г. в статье [20]. Материалы исследований юго-западной части оз. Горького, Новоегорьевского, Малинового и Большого Угловского получены в ходе полевых исследований в 2022 г.

Указанные водные объекты попадают под след радиоактивных выпадений Семипалатинского ядерного полигона. Схема расположения объектов исследования представлена на рис. 2.

Измерения плотности потока альфа- и бета-частиц от поверхности донных отложений проведены в полевых условиях с использованием дозиметра-радиометра МКС-03СА.

Оценка активности в пробах донных отложений ^{241}Am и ^{137}Cs выполнена с помощью гамма-спектрометра ORTEC GEM25P4-70. Содержание в пробе ^{90}Sr определено по дочернему ^{90}Y после радиохимического выделения с помощью бета-спектрометра TRI-CARB

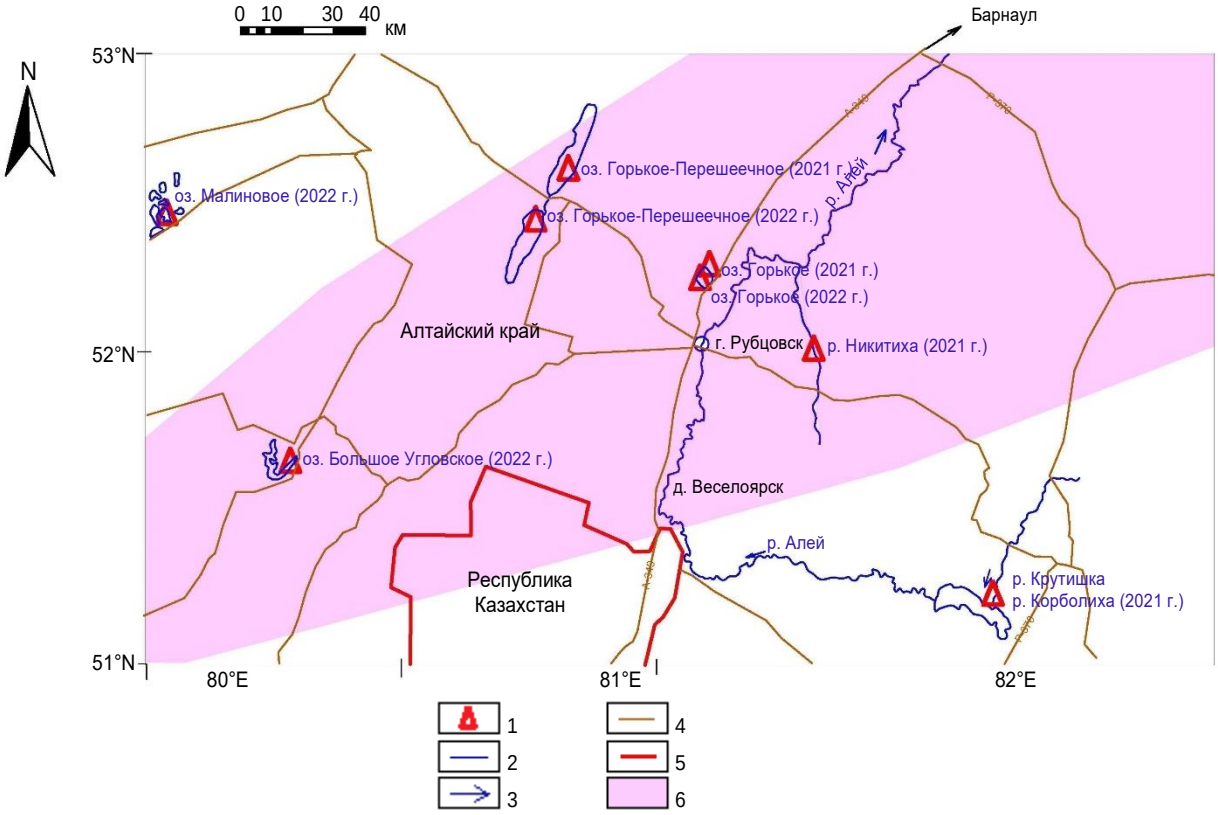

Рис. 2. Схема расположения объектов исследования:
1 – район отбора проб; 2 – речная сеть, контур акватории; 3 – направление течения водотока; 4 – ось автомобильной дороги; 5 – государственная граница; 6 – след радиоактивных выпадений
Fig. 2. Site diagram of research objects:
1 – sampling area; 2 – river network, water area contour; 3 – direction of watercourse flow; 4 – motor-road axis; 5 – state border; 6 – trace of radioactive fallouts

3110TR PerkinElmer. Изотопы $^{239+240}$Pu измерены с помощью альфа-спектрометра Alpha Analyst A1200-32AM CANBERRA после приготовления счетного образца методом экстракционно-хроматографического выделения и электролитического осаждения.

Лабораторные исследования проведены при помощи поверенного аналитического оборудования. Отбор образцов выполнен в соответствии с требованиями ГОСТ 17.1.5.01-80[4].

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты полевых исследований представлены в табл. 1.

По данным полевых исследований, мощность дозы гамма-излучения донных отложений оз. Горького-Перешеечного составила 0,08–0,12 мкЗв/ч, оз. Горького – 0,08–0,17 мкЗв/ч, р. Никитихи – 0,1–0,16 мкЗв/ч, р. Крутишки – 0,14–0,22 мкЗв/ч, р. Корболихи – 0,09–0,13 мкЗв/ч, оз. Малинового – 0,09–0,13 мкЗв/ч, оз. Большого Угловского – 0,10–0,14 мкЗв/ч.

После высушивания образцов донных отложений была проведена оценка плотности потока бета-частиц. По данным измерений определено, что плотность потока бета-частиц от поверхности донных отложений составляет: оз. Горького-Перешеечного – 0,4–1,6, оз. Горького – 0,4–2,3, р. Никитихи – 1,4–2,4,

Таблица 1. Результаты исследований проб донных отложений
Table 1. Research results of bottom sediment samples

Объект	Мощность дозы гамма-излучения, мкЗв/ч	Поток, бета-частиц/см^{2}мин	Год исследования*
Озеро Горькое-Перешеечное (восточная часть)	0,1 ± 0,02	1,3 ± 0,3	2021
Озеро Горькое-Перешеечное (юго-западная часть)	0,1 ± 0,02	0,5 ± 0,1	2022
Озеро Горькое (восточная часть)	0,14 ± 0,03	1,8 ± 0,5	2021
Озеро Горькое (юго-западная часть)	0,1 ± 0,02	0,5 ± 0,1	2022
Река Никитиха	0,13 ± 0,03	1,9 ± 0,5	2021
Река Крутишка	0,18 ± 0,04	3,3 ± 0,8	2021
Река Корболиха	0,11 ± 0,02	0,5 ± 0,1	2021
Озеро Малиновое	0,11 ± 0,02	0,7 ± 0,1	2022
Озеро Большое Угловское	0,12 ± 0,02	0,6 ± 0,1	2022
Предельно допустимый уровень**	0,3	0,4 Бк/см^2 (~10 бета-частиц/см^{2}мин)	–
Фоновое значение для почвенного покрова Алтайского края	0,09–0,12	< 0,5	–

Примечание: * Результаты исследований проб донных отложений 2021 г. взяты из работы авторов [20]. ** Предельно допустимый уровень указан согласно Основным санитарным правилам обеспечения радиационной безопасности от 26 апреля 2010 г.[5], Методике измерений параметров радиоактивного загрязнения производственных помещений, элементов производственного оборудования, средств индивидуальной защиты и кожных покровов работника для целей специальной оценки условий труда, утвержденной 6 декабря 2018 г.[6], Нормам радиационной безопасности НРБ-99/2009, утвержденным 7 июля 2009 г.[7].

[4] ГОСТ 17.1.5.01-80. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность. Введ. 01.01.1982 [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200012787 (27.04.2022).
[5] Об утверждении СП 2.6.1.2612-10 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010)»: постановление главного государственного санитарного врача Российской Федерации № 40 от 26 апреля 2010 г. [Электронный ресурс]. URL: https://orfi.ru/files/doc/uchcenter/osporb_2612612-10.pdf (27.04.2022).
[6] Методика измерений параметров радиоактивного загрязнения производственных помещений, элементов производственного оборудования, средств индивидуальной защиты и кожных покровов работника для целей специальной оценки условий труда. Утв. 06.12.2018. М., 2018. [Электронный ресурс]. URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293731/4293731319.pdf (27.04.2022).
[7] Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009: санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Утв. 7.07.2009. [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/902170553?marker=6560IO (27.04.2022).

р. Крутишки – 2,5–4,1, р. Корболихи – 0,4–0,6, оз. Малинового – 0,6–0,8, оз. Большого Угловского – 0,5–0,7 бета-частиц/мин см^2.

В результате экспрессных исследований донных отложений превышения радиоактивных показателей (мощности дозы и потока бета-частиц) зафиксировано не было.

Для получения количественных и качественных данных о радионуклидном составе донных отложений изучаемых водных объектов был проведен лабораторный спектрометрический анализ подготовленных образцов. Результаты испытаний образцов приведены в табл. 2.

Результаты лабораторных исследований показали, что на настоящий момент в донных отложениях водных объектов юго-западной части Алтайского края содержание образующихся в результате ядерных испытаний и при делении ядер в ядерных реакторах искусственных радионуклидов ^{137}Cs и ^{241}Am менее 1 Бк/кг. Исключение составили донные отложения оз. Горького-Перешеечного в восточной части (на глубине 0,2–0,4 м), р. Никитихи до обогатительной фабрики (южнее), где обнаружено 2 Бк/кг ^{137}Cs, и оз. Малинового, где зафиксировано содержание ^{137}Cs активностью 3 Бк/кг. Обнаруженные активности соответствуют фону глобальных выпадений и не могут быть однозначно идентифицированы как остатки радиоактивности от следов выпадений Семипалатинского ядерного полигона.

Содержание в донных отложениях ^{90}Sr обнаружено в оз. Горьком (с восточной стороны) до исследованной глубины 0,4 м, в р. Никитихе и оз. Малиновом.

Изотопы $^{239+240}$Pu обнаружены в донных отложениях всех исследуемых водных объектов. Активность данных изотопов в донных отложениях изменяется от 3,7 до 5,8 Бк/кг кроме западной части оз. Горького, Горького-Перешеечного, Малинового и Большого Угловского.

Содержание в донных отложениях естественных радионуклидов (^{40}K, ^{226}Ra, ^{232}Th) соответствует природному уровню, нормируемый показатель радиоактивности по естественным радионуклидам (удельная эффективная активность для исследуемых образцов) составил от 69 до 136 Бк/кг, что не превышает нормативного уровня в 370 Бк/кг[8].

Таблица 2. Результаты лабораторных исследований донных отложений на содержание радионуклидов
Table 2. Results of laboratory research of bottom sediment radionuclide composition

Место отбора	Глубина отбора образца, м	Содержание радионуклидов, Бк/кг							Год исследования*
		Искусственные				Естественные			
		^{241}Am	^{137}Cs	^{90}Sr	$^{239+240}$Pu	^{40}K	^{226}Ra	^{232}Th	
Озеро Горькое-Перешеечное (восточная часть)	0–0,2	< 1	< 1	< 0,4	< 0,4	670 ± 70	3 ± 1	7 ± 1	2021
	0,2–0,4	< 2	2 ± 1	< 0,4	4,9 ± 0,9	650 ± 65	6 ± 1	9 ± 1	2021
Озеро Горькое-Перешеечное (западная часть)	0,2–0,4	< 2	< 1	< 0,4	< 0,07	650 ± 65	< 1	8 ± 1	2022
Озеро Горькое (восточная часть)	0–0,2	< 2	< 1	1,2 ± 0,5	3,7 ± 0,9	590 ± 60	22 ± 2	32 ± 3	2021
	0,2–0,4	< 2	< 1	1,3 ± 0,8	5,1 ± 1,1	585 ± 60	24 ± 2	31 ± 3	2021
Озеро Горькое (западная часть)	0,2–0,4	< 2	< 1	< 0,4	< 0,17	510 ± 50	12 ± 2	30 ± 3	2022
Река Никитиха (до обогатительной фабрики)	0–0,2	< 2	2 ± 1	1 ± 0,6	5,4 ± 1,3	530 ± 50	23 ± 2	39 ± 4	2021
Река Никитиха (после обогатительной фабрики)	0–0,2	< 2	< 1	< 0,8	3,9 ± 1	500 ± 50	17 ± 2	32 ± 3	2021
Река Крутишка	0–0,2	< 2	< 1	< 0,5	4,3 ± 1,3	600 ± 60	33 ± 3	40 ± 4	2021
Река Корболиха	0–0,2	< 2	< 1	< 0,5	5,8 ± 1,3	550 ± 55	30 ± 3	45 ± 4	2021
Озеро Малиновое	0,2–0,4	< 2	3 ± 0,3	1 ± 0,5	< 0,14	600 ± 60	3 ± 1	15 ± 1,5	2022
Озеро Большое Угловское	0,2–0,4	< 2	< 1	< 0,4	< 0,19	600 ± 60	8 ± 1	20 ± 2	2022

Примечание: * Результаты исследований проб донных отложений 2021 г. взяты из работы авторов [20].

[8] Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009: санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Утв. 7.07.2009. [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/902170553?marker=6560IO (27.04.2022).

Заключение

Результаты проведенных исследований показали, что содержание искусственных и естественных радионуклидов в донных отложениях водоемов юго-западной части Алтайского края не превышает нормативного уровня. Остатки следов ядерных испытаний Семипалатинского испытательного полигона в исследуемых водных объектах в настоящее время не обнаружены.

Список источников

1. Коровина О. Ю., Комарова Л. Ф., Сомин В. А. Выбор основных показателей загрязнения поверхностных вод и донных отложений при проведении экологического мониторинга на примере Алтайского края // Безопасность, защита и охрана окружающей природной среды: фундаментальные и прикладные исследования: сб. докл. Всерос. науч. конф. (г. Белгород, 14–18 октября 2019 г.). Белгород: Изд-во БГТУ, 2019. С. 22–25.

2. Колядо И. Б., Плугин С. В., Трибунский С. И. Последствия влияния радиационного воздействия на территорию и население Алтайского края // Гигиена и санитария. 2018. Т. 97. № 7. С. 609–617. https://doi.org/10.18821/0016-9900-2018-97-7-609-617.

3. Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана. Вып. 1. Радиоэкологическое состояние «северной» части территории Семипалатинского испытательного полигона / под рук. С. Н. Лукашенко. Павлодар: Дом печати, 2010. 294 с.

4. Шойхет Я. Н., Киселев В. И., Лоборев В. М. Радиационное воздействие на население Алтайского края ядерных испытаний на Семипалатинском полигоне. Барнаул: Изд-во НИИ РМЭП, 1999. 346 с.

5. Рапута В. Ф., Ярославцева Т. В. Реконструкция следов радиоактивного загрязнения от наземных ядерных взрывов на Семипалатинском полигоне // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы V Междунар. конф. (г. Томск, 13–16 сентября 2016 г.). Томск: Изд-во СТТ, 2016. С. 541–545.

6. Медведев В. И., Коршунов Л. Г., Черняго Б. П. Радиационное воздействие Семипалатинского ядерного полигона на Южную Сибирь (опыт многолетних исследований по Восточной и Средней Сибири и сопоставление результатов с материалами по Западной Сибири) // Сибирский экологический журнал. 2005. Т. 12. № 6. С. 1055–1071.

7. Колядо И. Б. Плугин С. В., Коновалов Б. Ю. Последствия ядерных испытаний на Семипалатинском полигоне и новое в работе Алтайского медико-дозиметрического регистра // Аграрная наука – сельскому хозяйству: сб. статей. Барнаул: Изд-во АГАУ, 2016. В 3 кн. Т. 2. С. 296–297.

8. Трапезников А. В., Чеботина М. Я., Юшков П. И., Гусева В. П., Трапезникова В. Н. Исследование водных экосистем в районе Тоцкого радиоактивного следа в Оренбургской области // Проблемы радиоэкологии и пограничных дисциплин: сб. статей. Нижневартовск: Альстер, 2007. С. 145–151.

9. Трапезников А. В., Молчанова И. В., Караваева Е. Н., Трапезникова В. Н. Миграция радионуклидов в пресноводных и наземных экосистемах. Екатеринбург: Изд-во УрНИВИ, 2007. 400 с.

10. Трапезникова В. Н., Трапезников А. В., Коржавин А. В., Платаев А. П. Содержание тяжелых металлов и радионуклидов в рыбе рек Обь и Иртыш на территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры // Экология в средней и высшей школе: синтез науки и образования: материалы Всерос. науч.-практ. конф. (г. Челябинск, 03–04 октября 2012 г.). Челябинск: Изд-во ЧГПУ, 2012. С. 87–91.

11. Сидоркина О. М., Смагин А. И. Динамика самоочищения воды озера Иртяш от радиоактивного загрязнения // Проблемы географии Урала и сопредельных территорий: материалы II Междунар. науч.-практ. конф. (г. Челябинск, 22–23 мая 2020 г.). Челябинск: Край Ра, 2020. С. 164–171.

12. Смагин А. И., Сидоркина О. М., Тихонова М. А. Особенности поведения радионуклидов в пресноводных водоемах зоны воздействия ПО «Маяк» и их накопление рыбой // Наука ЮУрГУ: материалы LXVI науч. конф. (г. Челябинск, 15–17 апреля 2014 г.). Челябинск: ИЦ ЮУрГУ, 2014. С. 394–399.

13. Айдарханова А. К., Лукашенко С. Н. Характер радионуклидного загрязнения водных объектов бывшего Семипалатинского испытательного полигона // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы V Междунар. конф. (г. Томск, 13–16 сентября 2016 г.). Томск: СТТ, 2016. С. 40–43.

14. Айдарханова А. К. Ларионова Н. В., Мамырбаева А. С., Светачева Ю. В., Кумисханова С. Б. Современные уровни радионуклидного загрязнения природных озер территории Семипалатинского испытательного полигона // Современные проблемы радиобиологии, радиоэкологии и агроэкологии: сб. докл. Междунар. молодежн. конф. (г. Обнинск, 3–4 октября 2019 г.). Обнинск: Изд-во ВНИИРАЭ, 2019. С. 114–117.

15. Трапезников А. В., Юшков П. И., Николкин В. Н., Трапезникова В. Н., Чеботина М. Я., Гусева В. П. Распределение радионуклидов по основным компонентам оз. Червяное на территории ВУРСА // Экология. 2007. № 1. С. 30–36.

16. Коржавин А. В., Трапезникова В. Н., Николкин В. Н., Трапезников А. В. Сравнительный анализ уровней накопления техногенных радионуклидов в донных отложениях на различных участках Обь-Иртышской речной системы // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы VI Междунар. конф. (г. Томск, 20–24 сентября 2021 г.). Томск: Изд-во ТПУ, 2021. Т. 1. С. 265–268.

17. Параскив А. А., Терещенко Н. Н., Трапезников А. В., Проскурнин В. Ю., Платаев А. П., Чужикова-Проскурнина О. Д. Распределение радионуклидов плутония в донных отложениях соленых озер Крыма в

2016–2018 гг. // Озера Евразии: проблемы и пути их решения: материалы II Междунар. конф. (г. Казань, 19–24 мая 2019 г.). Казань: Изд-во АН РТ, 2019. Ч. 2. С. 151–156.

18. Терещенко Н. Н., Трапезников А. В., Параскив А. А., Проскурнин В. Ю., Платаев А. П., Чужикова-Проскурнина О. Д. Современное состояние распределения техногенных радионуклидов плутония ^{238,239,240}Pu в соленых озерах Крыма // Радиохемоэкология: успехи и перспективы: материалы чтений памяти акад. Г. Г. Поликарпова (г. Севастополь, 14–16 августа 2019 г.). Севастополь: Изд-во ФИЦ ИнБЮМ, 2019. С. 44.

19. Терещенко Н. Н., Трапезников А. В., Параскив А. А., Проскурнин В. Ю., Платаев А. П. Современные уровни долгоживущих радиоизотопов плутония в донных отложениях соленых озер Крыма // Радиационная биология. Радиоэкология. 2020. Т. 60. № 2. С. 211–221. https://doi.org/10.31857/S0869803120020113.

20. Коровина О. Ю., Сомин В. А. Экологическое состояние поверхностных вод и донных отложений водных объектов юго-западной части Алтайского края // Вестник НЯЦ РК. 2022. № 1. С. 43–45. https://doi.org/10.52676/1729-7885-2022-1-43-45.

References

1. Korovina O. Yu., Komarova L. F., Somin V. A. Selection of the main pollution sources of surface waters and bottom sediments during environmental monitoring for the case of the Altai Territory. In: *Bezopasnost', zashchita i okhrana okruzhayushchei prirodnoi sredy: fundamental'nye i prikladnye issledovaniya: sb. dokl. Vseros. nauch. konf. = Safety, protection and conservation of the natural environment: fundamental and applied research: collection of reports of the All-Russian Scientific Conference.* 14–18 October 2019, Belgorod. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov; 2019, p. 22–25. (In Russ.).

2. Kolyado I. B., Plugin S. V., Tribunsky S. I. Aftereffects of the impact of the radiation exposure on the territory and the population of the Altai Krai. *Gigiena i sanitariya = Hygiene and sanitation*. 2018;97(7):609-617. (In Russ.). https://doi.org/10.18821/0016-9900-2018-97-7-609-617.

3. Lukashenko S. N. *Topical issues of Kazakhstan radioecology. Iss. 1. Radioecological condition of the "northern" part of the Semipalatinsk test site territory*. Pavlodar: Dom pechati; 2010. 294 p. (In Russ.)/

4. Shoikhet Ya. N., Kiselev V. I., Loborev V. M. *Radiation impact of nuclear tests at the Semipalatinsk test site on the population of the Altai Territory*. Barnaul: Research Institute of Regional Medical and Environmental Problems; 1999. 346 p. (In Russ.).

5. Raputa V. F., Yaroslavtseva T. V. Reconstruction of radioactive contamination traces from terrestrial nuclear explosions at the Semipalatinsk test site. In: *Radioaktivnost' i radioaktivnye elementy v srede obitaniya cheloveka: materialy V Mezhdunar. konf. = Radioactivity and radioactive elements in the human environment: proceedings of the 5th International conference*. 13–16 September 2016, Tomsk. Tomsk: STT; 2016, p. 541–545. (In Russ.).

6. Medvedev V. I., Korshunov L. G., Chernyago B. P. Radiation impact of the Semipalatinsk nuclear test site on South Siberia (long-term studies in Eastern and Central Siberia as compared with the data on Western Siberia). *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*. 2005;12(6):1055-1071. (In Russ.).

7. Kolyado I. B. Plugin S. V., Konovalov B. Yu. Effects of nuclear tests at the Semipalatinsk test site and the new in the work of the Altai Medical and Dosimetric Register. In: *Agrarnaya nauka – sel'skomu khozyaistvu = Agrarian science to Agriculture*. Barnaul: Altai State Agricultural University; 2016, vol. 2, p. 296–297. (In Russ.).

8. Trapeznikov A. V., Chebotina M. Ya., Yushkov P. I., Guseva V. P., Trapeznikova V. N. Research of water ecosystems in the area of the Totsk radioactive trace in the Orenburg region. In: *Problemy radioekologii i pogranichnykh distsiplin = Problems of radioecology and related disciplines*. Nizhnevartovsk: Al'ster; 2007, p. 145–151. (In Russ.).

9. Trapeznikov A. V., Molchanova I. V., Karavaeva E. N., Trapeznikova V. N. *Migration of radionuclides in freshwater and terrestrial ecosystems*. Ekaterinburg: Ural Research Veterinary Institute; 2007. 400 p. (In Russ.).

10. Trapeznikova V. N., Trapeznikov A. V., Korzhavin A. V., Plataev A. P. The content of heavy metals and radionuclides in the fish of the Ob and Irtysh rivers on the territory of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug (Yugra). In: *Ekologiya v srednei i vysshei shkole: sintez nauki i obrazovaniya: materialy Vseros. nauch.-prakt. konf. = Ecology in secondary and higher school: synthesis of science and education: proceedings of the All-Russian scientific and practical conference.* 03–04 October 2012, Chelyabinsk. Chelyabinsk: Chelyabinsk State Pedagogical University; 2012, p. 87–91. (In Russ.).

11. Sidorkina O. M., Smagin A. I. Self-purification dynamics of the Lake Irtyash water from radioactive contamination. In: *Problemy geografii Urala i sopredel'nykh territorii: materialy II Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Problems of the Urals and adjacent territories geography: proceedings of the 2nd International scientific and practical conference*. 22–23 May 2020, Chelyabinsk. Chelyabinsk: Krai Ra; 2020, p. 164–171. (In Russ.).

12. Smagin A. I., Sidorkina O. M., Tikhonova M. A. Features of radionuclides behavior in freshwater reservoirs of the Industrial Group Mayak impact zone and their accumulation in fish. In: *Nauka YuUrGU: materialy LXVI nauch. konf. = Nauka SUSU: proceedings of the 66th scientific conference.* 15–17 April 2014, Chelyabinsk. Chelyabinsk: Publishing Center of South Ural State University; 2014, p. 394–399. (In Russ.).

13. Aidarkhanova A. K., Lukashenko S. N. The nature of radionuclide contamination of water bodies of the former Semipalatinsk test site. In: *Radioaktivnost' i radioaktivnye elementy v srede obitaniya cheloveka: materialy V Mezhdunar. konf. = Radioactivity and radioactive elements in human environment: proceedings of the 5th International Conference.* 13–16 September, 2016, Tomsk. Tomsk: STT; 2016, p. 40–43. (In Russ.).

14. Aidarkhanova A. K. Larionova N. V., Mamyrbaeva A. S., Svetacheva Yu. V., Kumiskhanova S. B. Modern levels of radionuclide contamination of natural lakes in the territory of the Semipalatinsk test site. In: *Sovremennye prob-*

lemy radiobiologii, radioekologii i agroekologii: sb. dokl. Mezhdunar. molodezhn. konf. = Modern problems of radiobiology, radioecology and agroecology: collected reports of the International youth conference. 3–4 October 2019, Obninsk. Obninsk: Russian Institute of Radiology and Agroecology; 2019, p. 114–117. (In Russ.).

15. Trapeznikov A. V., Yushkov P. I., Nikolkin V. N., Trapeznikova V. N., Chebotina M. Ya., Guseva V. P. Distribution of radionuclides among the main components of lake Chervyanoe in the Eastern Ural radioactive trace. *Ekologiya*. 2007;1:30-36. (In Russ.).

16. Korzhavin A. V., Trapeznikova V. N., Nikolkin V. N., Trapeznikov A. V. Comparative analysis of the accumulation levels of technogenic radionuclides in bottom sediments at various sites of the Ob-Irtysh river system. In: *Radioaktivnost' i radioaktivnye elementy v srede obitaniya cheloveka: materialy VI Mezhdunar. konf. = Radioactivity and radioactive elements in the human environment: proceedings of the 5th International conference*. 20–24 September 2021, Tomsk. Tomsk: National Research Tomsk Polytechnic University; 2021, vol. 1, p. 265–268. (In Russ.).

17. Paraskiv A. A., Tereshchenko N. N., Trapeznikov A. V., Proskurnin V. Yu., Plataev A. P., Chuzhikova-Proskurnina O. D. Plutonium radionuclides distribution in the bottom sediments of the salt lakes of Crimea in 2016-2018. In: *Ozera Evrazii: problemy i puti ikh resheniya: materialy II Mezhdunar. konf. = Lakes of Eurasia: problems and solutions: proceedings of the 2nd International conference*.19–24 May 2019, Kazan. Kazan: Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan; 2019, pt. 2, p. 151–156. (In Russ.).

18. Tereshchenko N. N., Trapeznikov A. V., Paraskiv A. A., Proskurnin V. Yu., Plataev A. P., Chuzhikova-Proskurnina O. D. The current state of distribution of 238,239,240Pu plutonium technogenic radionuclides in the salt lakes of Crimea. In: *Radiokhemoekologiya: uspekhi i perspektivy: materialy chtenii pamyati akad. G. G. Polikarpova = Radiochemoecology: successes and prospects: materials of the Readings in memory of the Academician G. G. Polikarpov.* 14–16 August 2019, Sevastopol. Sevastopol: Federal Research Center "Institute of Biology of the South Seas named after A.O. Kovalevsky RAS"; 2019, p. 44. (In Russ.).

19. Tereshchenko N. N., Trapeznikov A. V., Paraskiv A. A., Proskurnin V. Yu., Plataev A. P. Modern levels of long-lived radioisotopes of plutonium in bottom sediments of salt lakes of Crimea. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation Biology. Radioecology*. (In Russ.). 2020; 60(2):211-221. https://doi.org/10.31857/S0869803120020113.

20. Korovina O. Yu., Somin V. A. Environmental state of surface waters and bottom sediments in water bodies of the southwestern part of the Altai territory. *Vestnik NYaTs RK = NNC RK Bulletin*. 2022;(1):43-45. https://doi.org/10.52676/1729-7885-2022-1-43-45.

Информация об авторах / Information about the authors

Коровина Оксана Юрьевна,
аспирант,
Институт биотехнологии, пищевой и химической инженерии,
Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия,
korano@mail.ru,
https://orcid.org/0000-0003-1822-0987.
Oksana Yu. Korovina,
Postgraduate Student,
Institute of Biotechnology, Food and Chemical Engineering,
Polzunov Altai State Technical University,
Barnaul, Russia,
korano@mail.ru,
https://orcid.org/0000-0003-1822-0987.

Сомин Владимир Александрович,
доктор технических наук,
заведующий кафедрой химической техники и инженерной экологии,
Институт биотехнологии, пищевой и химической инженерии,
Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия,
vladimir_somin@mail.ru,
https://orcid.org/0000-0003-3276-5174.
Vladimir A. Somin,
Dr. Sci. (Eng.),
Head of the Department of Chemical Engineering and Engineering Ecology,
Institute of Biotechnology, Food and Chemical Engineering,
Polzunov Altai State Technical University,
Barnaul, Russia,
vladimir_somin@mail.ru,
https://orcid.org/0000-0003-3276-5174.

Айдарханова Альмира Курмановна,
начальник отдела разработки систем мониторинга окружающей среды,
Институт радиационной безопасности и экологии,
г. Курчатов, Республика Казахстан,
almira@nnc.kz,
https://orcid.org/0000-0003-3737-7111.
Almira K. Aidarkhanova,
Head of the Department of Environmental Monitoring System Development,
Institute of Radiation Safety and Ecology,
Kurchatov, Republic of Kazakhstan,
almira@nnc.kz,
https://orcid.org/0000-0003-3737-7111.

Комарова Лариса Федоровна,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры химической техники и инженерной экологии,
Институт биотехнологии, пищевой и химической инженерии,
Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия,
htie@mail.ru,
https://orcid.org/0000-0001-9321-5729.
Larisa F. Komarova,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Chemical Engineering and Engineering Ecology,
Institute of Biotechnology, Food and Chemical Engineering,
Polzunov Altai State Technical University,
Barnaul, Russia,
htie@mail.ru,
https://orcid.org/0000-0001-9321-5729.

Вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 06.05.2022; одобрена после рецензирования 14.09.2022; принята к публикации 07.11.2022.
The article was submitted 06.05.2022; approved after reviewing 14.09.2022; accepted for publication 07.11.2022.