

## ПРИРОДНЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ И ЦЕЗИЙ-137 В ПОЧВАХ И ДОННЫХ ОСАДКАХ ОЗЕРА ХАНКА

К.В. Савельева<sup>1</sup>, Д. Дженг<sup>2</sup>, А.К. Рожкова<sup>3</sup>, Д.Х. Шлык<sup>4</sup>, Э.А. Токарь<sup>5</sup>,  
Т.А. Воробьева<sup>6</sup>, Н.В. Кузьменкова<sup>7</sup>

<sup>1–3, 6, 7</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

<sup>4, 5</sup> Институт химии ДВО РАН, лаборатория рентгеноструктурного анализа

<sup>1</sup> Факультет почвоведения, кафедра радиэкологии и экотоксикологии, магистр; e-mail: universe2910.67@gmail.com

<sup>2</sup> Химический факультет, кафедра радиохимии, магистр; e-mail: zhengzhaogang98@gmail.com

<sup>3</sup> Химический факультет, кафедра радиохимии, канд. хим. наук; e-mail: aleksandra.rozhkova@chemistry.msu.ru

<sup>4</sup> Канд. хим. наук; e-mail: daria79@list.ru

<sup>5</sup> Канд. хим. наук; e-mail: d.edd@mail.ru

<sup>6</sup> Географический факультет, кафедра рационального природопользования,  
доц., канд. геогр. наук; e-mail: tvorobyova@yandex.ru

<sup>7</sup> Химический факультет, кафедра радиохимии, вед. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: kuzmenkovanv@my.msu.ru

В статье рассматривается радионуклидный состав почв территорий, прилегающих к озеру Ханка, а также донных отложений озера и реки Спасовки, впадающей в Ханку. Рассмотрены вопросы распространения и пространственной изменчивости удельной активности естественных ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ) и искусственного ( $^{137}\text{Cs}$ ) радионуклидов. Хозяйственное использование водосборного бассейна озера Ханка приобрело в последние годы особое значение, так как территория попала под государственную программу «Дальневосточный гектар», поэтому в статье подчеркивается значимость изучения загрязнения природной среды и геоэкологических проблем, а также необходимости принятия мер по их решению. В статье подробно описывается состав и свойства почв вблизи озера Ханка, определены условия радиальной миграции радионуклидов. Равнинные места с высокой влажностью и водоупорным горизонтом благоприятны для торфообразования (горизонт торфа может достигать 50 см), что способствует миграции радионуклидов в более глубокие горизонты. На возвышенных территориях формируются оглеенные дерново-подзолистые и подзолисто-буроземные почвы глинистого и суглинистого гранулометрического состава, что наоборот препятствует миграции радионуклидов вниз по профилю. Для почв установлено среднее содержание органической составляющей – 4%. Для некоторых образцов выявлен минералогический состав, демонстрирующий наличие, помимо калиевых и натриевых полевых шпатов, фаз гипса кальциевого лангбейнита в верхних слоях, что указывает на использование соляных сульфатных минеральных удобрений. Для донных осадков содержание органических веществ составило 2–3%. Определены фоновые уровни запасов радионуклидов в почвах в районе расположения озера:  $^{137}\text{Cs}$  – 18–177 Бк/м<sup>2</sup>;  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$  – 500–1800 Бк/м<sup>2</sup>;  $^{40}\text{K}$  – 1300–11000 Бк/м<sup>2</sup> соответственно. Установлено отсутствие влияния радиационных катастроф на территорию исследования. Обнаружено интенсивное вымывание  $^{40}\text{K}$  с водосбора озера поверхностным стоком. Наименьшее содержание запасов  $^{40}\text{K}$  обнаружено в почвах и речных донных отложениях (до 1–10 кБк/м<sup>2</sup> соответственно), а наибольшее – в озерных отложениях (8–20 кБк/м<sup>2</sup>).

**Ключевые слова:** удельная активность, условия миграции радионуклидов

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.2.5

### ВВЕДЕНИЕ

Геоэкологические проблемы Приморского края, водосборного бассейна оз. Ханка и, в частности, биосферного заповедника «Ханкайский», влияющие на стабильность экосистем охраняемой зоны, активно обсуждаются в последние годы [Иванова и др., 2022; Клышевская и др., 2019; Mikhailovskaya et al., 2017; Kiku et al., 2014; Baklanov et al., 2019]. Однако основной упор в них делается на проблеме распространения валовых и подвижных форм тяжелых металлов в водах бассейна оз. Ханка. Рас-

пространению и пространственной изменчивости удельной активности естественных и искусственных радионуклидов уделяется гораздо меньше внимания. Многочисленные экологические, геохимические и другие исследования не выявляют превышения фонового уровня загрязнения в почвенно-растительном покрове даже такими распространенными техногенными радионуклидами, как  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  [Клышевская и др., 2019]. Вклад  $^{137}\text{Cs}$  от АЭС «Фукусима» составляет от 11 до 300 Бк/м<sup>2</sup> в почвах Приморского края, что соответственно не

превышает 22% от общего содержания этого радионуклида в почве [Mikhailovskaya et al., 2017]. Общие запасы  $^{137}\text{Cs}$  в донных осадках озера Ханка по оценкам китайских исследователей [Zhang et al., 2022] на данный момент составляют 4600 Бк/м<sup>2</sup>. Испытания ядерного оружия, проводимые, например, в Китайской Народной Республике на полигоне Лоб-Нор, или Чернобыльская катастрофа не оказали влияния на радиационный фон района расположения оз. Ханка [Сойфер, 2002]. Основу естественного радиационного фона местности составляет радиоактивность горных пород (продукты распада рядов  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$ ).

Для территории вокруг оз. Ханка оценка удельной активности  $^{40}\text{K}$  особенно актуальна, так как большая часть этих территорий на сегодняшний день активно используется для выращивания сельскохозяйственных культур. В свою очередь, применение минеральных удобрений, в частности калийных, увеличивает риск загрязнения почв  $^{40}\text{K}$ , поскольку вместе с почвенными частицами выносятся азотные, фосфорные и калийные удобрения. Концентрация взвешенных частиц, вынесенных в результате эрозии почв, в водах оз. Ханка по результатам китайских исследователей в 1996 г. составляла около 50 мг/л, что в несколько раз ниже их концентрации в водах Малой Ханки [Xiangnan, 2010]. Предполагается, что эта разница обусловлена разными методами измерения взвешенных частиц, однако, отмечается также, что такие высокие значения концентрации взвешенных частиц типичны как для китайской, так и для российской частей озера. Результаты отечественных исследователей по гидрохимическим показателям соответствуют нормативам, однако обнаружено превышение предельно допустимых концентраций взвешенных частиц в основной акватории оз. Ханка [Катайкина, Матвеев, 2022]. По показателю концентрации биогенных элементов в водах озера не было обнаружено превышения санитарных норм [Коженкова, Юрченко, 2022].

Целью данной работы было определение фоновых уровней радионуклидов  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  в донных осадках оз. Ханка и почвах прибрежных территорий, выявление закономерностей их пространственного распределения в районе исследований. Для достижения поставленной цели нами впервые были проведены комплексные исследования почв вокруг озера, донных осадков реки и самого озера на содержание в них гамма-излучающих радионуклидов.

## ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Геоморфология озера.** Озеро Ханка – это мелководный водоем со средней глубиной 4,5 м, который является самым крупным пресноводным озером

Восточной Азии, расположенным в центре Приханкайской низменности. Площадь водной поверхности варьирует от 5010 до 3940 км<sup>2</sup> в зависимости от сезонных условий. Озеро имеет около 90 км в длину и максимум 67 км в ширину. Площадь водосбора 21 770 км<sup>2</sup> (рис. 1). В озеро впадает 24 реки, но вытекает только р. Сунгача, которая соединяет его с р. Уссури, а затем с Амуром. Бассейн оз. Ханка расположен в средней части Западно-Ханкайско-Раздольненской тектонической депрессии. Орография водосборного бассейна озера представлена постепенным переходом от хребтов со среднегорным и низкогорным рельефом на востоке к мелкогорному и холмисто-увалистому рельефу на западе [Худяков, 1972]. Уровенный режим озера контролируется двумя основными факторами. Первый – водный баланс озера, обусловленный величиной накопленного влагозапаса на каждый момент времени, в том числе и подземного. Его динамика определяет общий сезонный и многолетний режим уровня. Второй фактор – ветровые воздействия, вызывающие систематические сгонно-нагонные децивелизации уровня, временной масштаб которых измеряется часами и сутками.

**Климат.** Озеро Ханка лежит в области умеренного муссонного климата восточного сектора материка. Климатические условия в Ханкайской котловине определяются в основном муссонными и местными циркуляционными процессами. Мелководные пойменные водоемы ежегодно полностью промерзают, а снежный покров сохраняется около 130 дней в году (с декабря по март). В среднем, за год на территории оз. Ханка выпадает до 600 мм осадков, из которых 500 мм – в летнее время. В течение года повторяемость и направление ветров меняется в зависимости от сезона, преобладающими являются южное и юго-западное направления – от 33 до 48% (по станциям Хороль и Халкидон). Наибольшая среднемесячная скорость ветра в приозерье отмечается в апреле–мае: от 4 до 6 м/с [Попова, Качур, 2019].

**Почвообразующие породы и почвы.** Исследуемая область частично относится к Приханкайской низменности, которая сложена в основном песчано-глинистыми отложениями, покрытыми мощной толщей озерных и аллювиальных отложений. Почвообразующие породы Приханкайской низменности относятся к сложным нерасчлененным генетическим подразделениям и представляют собой озерные, аллювиальные и озерно-иллювиальные отложения. Это в основном рыхлые породы глинистого и тяжелосуглинистого гранулометрического составов с включениями обломочных наносных материалов [Национальный..., 2011]. Равнинные территории с луговой растительностью в связи

с плотной подстилающей породой заболочены, поэтому почвенный покров вблизи оз. Ханка на востоке и юго-востоке представлен в основном торфяными, луговыми и глеевыми почвами. Они характеризуются различным гранулометрическим и минералогическим составом, а распределение илистого вещества по профилю почв имеет слоистый характер. Равнинные места с высокой влажностью и водоупорным горизонтом создают благоприятные условия для торфообразования. Западная и юго-западная части исследуемой территории характеризуются достаточно сильной рас-

члененностью рельефа и высоким разнообразием почв. В прибрежных областях под лесной широколиственной растительностью с преобладанием дуба формируются дерново-подзолистые почвы с разными степенями оподзоливания и оглеения в нижних частях профиля. На возвышенных территориях под древесной широколиственной растительностью формируются богатые перегноем дерново-подзолистые и подзолисто-буроземные почвы с признаками оглеения в более глубоких частях профиля [Клышевская, 2019; Национальный..., 2011].

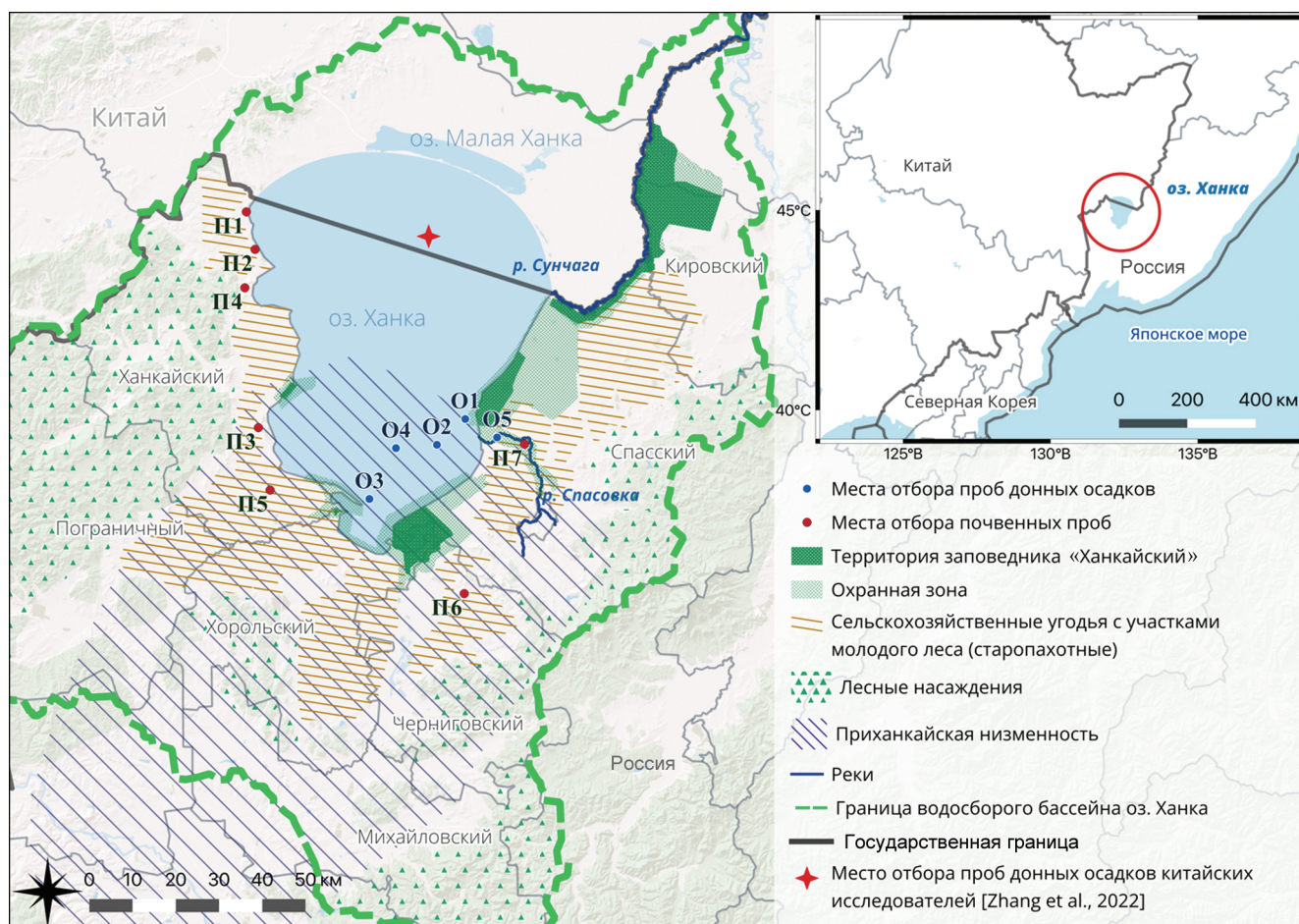


Рис. 1. Карта-схема отбора почв и донных осадков

Fig. 1. Map-scheme of selection of soils and bottom sediments

**Геохимия ландшафтов.** В соответствии с теорией геохимических ландшафтов, выделенных по условиям миграции радионуклидов, территория вокруг озера Ханка относится к группе агроландшафтов и лесостепей амурских и уссурийских видов. Выделяются глеевые и сорбционные геохимические барьеры. Обстановка характеризуется контрастными условиями механической латеральной миграции элементов между компонентами ландшафтов, от слабой на выровненных поверхностях до очень

энергичной на расчлененной местности [Перельман, 1975]. Большое значение для концентрации искусственных изотопов имеют сорбционные барьеры, меньшее – щелочных, восстановительных и др. Радиоактивные аномалии, образующиеся на барьерах, характеризуются высокой контрастностью, что облегчает их выявление (возможна меньшая чувствительность анализа и т. д.).

**Донные осадки.** Озерная котловина заполнена четвертичными отложениями мощностью 200 см.

Осадки оз. Ханка имеют терригенное происхождение и представлены в виде спрессованных песков и тонкозернистых глин, слои которых, вероятно, образованы за счет зерновых потоков [Павлюткин, Ханчук, 2002]. Несмотря на то что почвы вокруг оз. Ханка сложены бурыми суглинками, которые обуславливают мутность воды озера, глинистые осадки в озере распределены очень локально, причем самые большие площади занимают наиболее тонкие пелиты. В условиях активного водного режима большая часть пелитов для мелководного озера является транзитной. В местах поступления глинистого материала (устья равнинных рек) отмечается накопление отложений с преобладанием алевролитов [Росликова, 2006].

Растительность и сельскохозяйственное использование. Современный естественный растительный покров этой области, сформировавшийся после малого ледникового периода, представляет собой дубовые и кедрово-широколиственные леса. Растительный покров Ханкайско-Уссурийской равнины в связи с продолжительным вовлечением ее в хозяйственное использование сильно изменен. Большая часть выположенной территории занята сельскохозяйственными угодьями или заболочена. На сегодняшний момент преобладающим типом сельскохозяйственного использования почвенных ресурсов исследуемой территории является земледелие – в Ханкайском районе пашня занимает 22% от общей площади, в Спасском – 19, Хорольском – 47, Черниговском – 18%. На юге Дальнего Востока сконцентрировано производство сои, а вокруг озера Ханка есть рисоводство и еще более интенсивное овощеводство, которое требует больших мелиоративных работ [Национальный..., 2011].

В связи с активным сельскохозяйственным использованием бассейна озера Ханка, применением токсичных пестицидов, сбросом сточных вод в реки, а также с атмосферными осадками, загрязненными техногенными выбросами, в почвах, поверхностных водах и донных осадках накапливаются тяжелые металлы и радионуклиды [Доклад об экологической..., 2021]. Большая часть территории, прилегающей к озеру Ханка, относится к биосферному заповеднику «Ханкайский» (см. рис. 1). В связи с этим мониторинг состояния окружающей среды, в том числе радиологические исследования и исследования геохимической изменчивости этой территории, является неотъемлемой частью ее сохранения.

Объектами исследования являлись почвы территорий, прилегающих к оз. Ханка, разной степени удаленности от берегов озера (от 0,5 до 22 км), донные осадки южной части озера, а также донные осадки реки Спасовка в 5 км от устья.

## МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Местом отбора почвенных проб были выбраны выположенные и залесенные участки, прилегающие к оз. Ханка с западной (см. рис. 1, точки П-1–П-5), южной (см. рис. 1, П-6) и восточной (см. рис. 1, П-7) сторон. Отбор почвенных образцов проводился на референсных участках, на сегодняшний день не используемых в сельскохозяйственных целях. Керны отбирались под молодым лесом. В процессе отбора идентифицировался старопашотный горизонт. По глубине его нахождения, а также по возрасту леса можно предположить, что данные участки активно использовались в сельскохозяйственных целях более 60 лет назад, до начала глобальных выпадений. Отбор почвенных кернов проводился с помощью металлического профиля 5×6 см. Керны были разрезаны с шагом 1 см и упакованы в транспортировочные пакеты. После доставки в лабораторию, пробы были просушены (100°C), перетерты и просеяны через сито 1 мм. Крупнозем (>1 мм), часто встречающийся на глубине 15–20 см (образцы П-3, П-4, П-5), извлекался из образцов и не участвовал во взвешивании и последующих анализах. Отобранные образцы почв характеризуются различным гранулометрическим составом от супеси до глины в зависимости от глубины.

Отбор проб донных осадков проводился в 2021 г. в южной (О-3) и юго-восточной частях озера Ханка (О-1, О-2, О-4), а также в реке Спасовке (О-5) (см. рис. 1). Образцы отбирались с помощью модифицированного пробоотборника Nesie [Грабенко, 2022] с глубины 3–4 м. Полученные керны разрезались с шагом 0,5 или 1 см, а затем пробы были просушены и перетерты.

В результате полевых работ отобрано семь кернов почв и пять кернов донных осадков, четыре из которых из оз. Ханка и один из р. Спасовки (см. рис. 1). Суммарно было проанализировано 182 почвенные пробы и 120 проб донных осадков.

Содержание гамма-излучающих радионуклидов определяли на гамма-спектрометре ORTEC GEM-C5060P4-B, оснащенный полупроводниковым детектором из высокочистого германия (HPGe) с Ве окном и относительной эффективностью 20%. Исследовано содержание следующих природных и техногенных радионуклидов:  $^{137}\text{Cs}$  (661 кэВ),  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  (1460 кэВ). Удельная активность  $^{238}\text{U}$  оценивалась по двум линиям, принадлежащим  $^{226}\text{Ra}$  (186 кэВ) и его дочернему  $^{214}\text{Bi}$  (609 кэВ). Удельная активность  $^{232}\text{Th}$  оценивалась по дочерним  $^{228}\text{Ac}$  (911,2 кэВ) и  $^{212}\text{Pb}$  (238,6 кэВ). Масса образцов варьировала от 1,2 до 12 г. Время измерения составляло не менее 60 000 с. Систематические погрешности включают ошибки отбора проб (3%), пробоподготовки (2%) и аналитических измерений (2%) и в сумме не превышают 8%.

Датирование скорости осадконакопления в озере проводилось с помощью  $^{137}\text{Cs}$ , который давно применяется для оценки скоростей отложения наносов в водоемах [Putyrskaya et al., 2020; Semertzidou et al., 2019; Rose et al., 2011]. Пик глобальных выпадений  $^{137}\text{Cs}$  приходится на 1963 г. Чернобыльские выпадения, а также авария на Фукусиме не оказали влияния на территорию исследования.

Количественный минеральный анализ отобранных для исследования осадков проведен методом полнопрофильного рентгенодифракционного анализа порошковых препаратов на рентгеновском дифрактометре D8 ADVANCE с использованием программы поиска EVA с банком порошковых данных PDF-2. Рентгенограммы образцов записаны в диапазоне углов  $203-85^\circ$  с шагом  $0,02^\circ$  при счете в точке 0,6 с.

Для определения содержания органического вещества пробы были прокалены при температуре  $600^\circ\text{C}$  в течении четырех часов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В соответствии с Атласом почв Российской Федерации почвы территорий отбора образцов относятся к отделам текстурно-дифференцированных и глеевых почв и принадлежат типам дерново-подзолистых, дерново-подзолисто-глеевых и темногумусово-глеевых по классификации и диагностике почв РФ (аналогом последних частично являются луговые почвы по «Классификации и диагностике почв СССР») [Национальный..., 2011]. Однако анализ свойств исследованных почвенных разрезов показывает лишь частичное соответствие характеристик реальных профилей с картой почвенного покрова Атласа. На данный момент не существует более детальных карт почвенного покрова территорий, прилегающих к оз. Ханка, поэтому такие несоответствия не удивительны ввиду локальных особенностей микро- и мезорельефа, а также состава растительности и антропогенных факторов. Предлагается отнести разрез П-1 к дерново-подзолистым глееватым почвам в силу явных признаков оглеения во влажном состоянии, каких не обнаружено в остальных случаях. Разрезы П-2–П-6 отнесены к дерново-подзолистым почвам без конкретных указаний подтипов.

Почвенный керн П-1 расположен недалеко от поселка Турий Рог, под лесными насаждениями (см. рис. 1). Позиция в рельефе определяется как водораздельная, ненарушенная, под молодым дубовым лесом в зоне холмисто-увалистого и мелкоопочного рельефа. Отличительной особенностью данного разреза являются сизые и охристые пятна и железисто-марганцевые примазки по всему профилю, на-

чиная от 8 см, что говорит об активно проходящих окислительно-восстановительных процессах. Наличие признаков смыва или выдувания не идентифицируется. Плотность горизонтов почв варьирует от 0,4 в верхних горизонтах до  $1,8 \text{ г/см}^3$  в средней части керна. Точки отбора проб П-2–П-4 располагаются также на западном берегу озера под молодым лесом на водораздельной поверхности. Почвы имеют более развитые гумусовые горизонты (до 17 см) и хорошо выраженный переход к элювиальному горизонту. Профиль П-4 отличается мощным темно-гумусовым горизонтом со слабой и средней степенью разложенности органических остатков. Также у профилей П-2–П-4 высокая плотность в нижних частях профиля, по сравнению с П-1, и широкая амплитуда колебаний плотности от верхних горизонтов к нижним ( $0,3-2,3 \text{ г/см}^3 \pm 0,3-0,5$ ), что указывает на более ярко выраженную текстурную дифференциацию профиля.

В третью группу разрезов, расположенных на юго-западе (П-5), юге (П-6) и востоке (П-7) от оз. Ханка, попали почвы, наиболее отличающиеся по мощности гумусового горизонта, выраженности процессов элювиально-иллювиальной дифференциации, оструктуренности горизонтов и гранулометрическому составу. Точки отбора располагаются на озерной террасе. Позиция в рельефе – низменная аккумулятивная равнина. Плотность горизонтов этих почв в среднем составила  $1,0 \pm 0,3 \text{ г/см}^3$ . Для более полной характеристики почвенных образцов был проведен минералогический анализ разрезов П-5, П-6 и П-7. В фазовом составе всех проб в основном выделяются рефлексы с повышенной интенсивностью кварца и группы широко распространенных алюмосиликатов, полевых шпатов типа альбита ( $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ ), анортита ( $\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$ ), с вероятным содержанием примесей К и Са. Во всех пробах с увеличением глубины разреза соотношение интенсивности соответствующих гало изменяется, что, вероятно, связано с изменением природных условий, играющих основную роль в процессе переноса и концентрирования компонентов. Одним из продуктов изменения полевых шпатов является смешанный минерал разряда слюда-сметтит ректорит  $(\text{Na,Ca})\text{Al}_4(\text{Si,Al})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ , идентифицированный в верхних слоях пробы П-7. В верхних слоях пробы П-6 была идентифицирована фаза анортклаза и дисордерида  $((\text{Na,K})[(\text{AlSi}_3)\text{O}_8])$ , относящихся к щелочным полевым шпатам и занимающих промежуточное положение между санидином и альбитом, что свидетельствует о насыщенности почвы натрием и преобладанием окиси натрия ( $\text{Na}_2\text{O}$ ). При переходе к более глубоким слоям данная фаза полностью переходит в альбит. В отличие от других образцов, во всем профиле почвы П-5 был обнаружен

калиевый полевой шпат, ортоклаз ( $K(AlSi_3O_8)$ ), что свидетельствует о повышенной кислотности данной почвы. Отличительной особенностью разрезов П-6 и П-7 является наличие в верхних слоях нехарактерных фаз гипса ( $CaSO_4$ ) и кальциевого лангбейнита ( $K_2Ca_2(SO_4)_3$ ), что вероятно связано с использованием соляных сульфатных минеральных удобрений на обширных сельскохозяйственных угодьях данной местности. Начиная с горизонта 5–6 см данная фаза не была обнаружена вследствие разложения данных соединений под действием естественных факторов.

Для донных осадков озера Ханка характерно разделение на слои из светло-коричневого песка (0–2 см), темно-серой глины (2–13 см), темной глины (13–14 см), крупнозернистого песка с инородными включениями (14–16 см) и глины с железо-оксидными новообразованиями (16–25 см). Для пробы О-1 (рис. 2А) характерно повышенное содержание илстой фракции в нижних горизонтах. Установлено, что плотность осадка по вертикали увеличивается при переходе к более глубоким горизонтам, что указывает на повышение скорости осадконакопления в последние десятилетия ввиду подъема уровня воды в ходе увеличения среднемноголетнего количества осадков, сопровождающегося расширением заболоченной области, прилегающей к озеру. Доля органической составляющей, установленной в процессе отжига, составила 2–3 и 4% для донных осадков и почвы соответственно. Керна речных наносов (О-5) отличает высокое содержание (5%) органики. Керна был отобран из центральной части русла реки, с глубины 2,3 м (см. рис. 2В). Главным фазовым компонентом осадка является кварц, составляющий основу песков. Выявлены также группы широко распространенных алюмосиликатов, полевых шпатов магматического происхождения – альбит ( $Na[AlSi_3O_8]$ ), анортит ( $Ca[Al_2Si_2O_8]$ ). С увеличением глубины интенсивность соответствующих пиков меняется, что, скорее всего, связано с изменениями природных условий. Наличие в водоеме большого количества разнообразных пресноводных двусторчатых и других моллюсков, а также повышенное содержание бикарбонатов приводит к образованию полиморфов карбоната кальция – кальцита и арагонита. Установлено присутствие необычной для данного района ферри-санидиновой фазы ( $KNa[FeSi_3O_8]$ ) с возможными примесями Al, Ti, Mg. Ее образование может быть связано с водной миграцией техногенного железа, вовлеченного в последующие биогенные процессы.

Распределение искусственного  $^{137}Cs$  в почвах под естественными угодьями на территории исследования достаточно равномерно. Самая высокая удельная активность  $^{137}Cs$  была обнаружена в почвенных кернах П-3 и П-5 в первых 5 см профиля и составила от 42 до 47 Бк/кг соответственно. Средние зна-

чения содержания радиоцезия в 30-сантиметровой толщии почв всех точек варьировали от  $11,1 \pm 9,7$  до  $5,6 \pm 7,2$  Бк/кг. При этом плотность загрязнения низкая и не превышала 150 Бк/м<sup>2</sup> для всех исследованных профилей. Это указывает на отсутствие здесь влияния каких-либо радиационных катастроф. После разового попадания искусственного цезия в окружающую среду, его миграция в ландшафте происходит с минеральными частицами, т. к.  $^{137}Cs$  фиксируется межпакетным пространством глинистых минералов [Bolca et al., 2007; Corbett, Walsh, 2015]. Это затрудняет миграцию радионуклида вниз по профилю почв и уменьшает его биодоступность, поэтому  $^{137}Cs$  в почвах преимущественно сконцентрирован в верхнем 5-сантиметровом слое.

Совершенно другая картина распределения в донных осадках. В среднем удельная активность  $^{137}Cs$  в осадках на порядок ниже, чем в почвах вблизи водных объектов, с максимальным значением в точке О-3  $10,0 \pm 1$  Бк/кг на глубине 3 см. Также выделяется четкий пик глобальных выпадений на глубине 9 см для точки О-1 ( $9,6 \pm 1$  Бк/кг), что связано с расположением точки (см. рис. 1) в той части акватории озера, куда впадает река Спасовка и где происходит более интенсивное поступление наносов с водосбора. Профильное распределение  $^{137}Cs$  в донных осадках указывает на неравномерное накопление наносов в озере. Вероятно, в южной и центральной части исследованной акватории озера сток наносов происходит медленнее, чем в северо-восточной. Скорость осадконакопления для точки О-1 составляет примерно 1,6 мм/год, тогда как в южной (О-3) и центральной частях (О-2) около 0,8 мм/год [Kuzmenkova et al., 2023]. Профиль О-1 располагается в непосредственной близости от устья реки Спасовка, тогда как точки О-2 и О-3 находятся дальше, и скорость осадконакопления здесь ниже. Для точки О-4, самой дальней от берегов озера, максимальное содержание изотопа цезия отмечено в верхнем горизонте, то есть скорость осадконакопления здесь минимальна.

Удельная активность  $^{40}K$  в почвенных профилях указывает на высокое его содержание в почвах (от  $304 \pm 60$  до  $741 \pm 156$  Бк/кг), особенно в нижних слоях. В кернах П-5 наблюдается повышенное содержание  $^{40}K$  относительно других точек отбора. Вероятно, когда-то здесь проводились сельскохозяйственные мероприятия, включающие внесение минеральных и органических удобрений, которые повлияли на содержание этого радионуклида в почве [Bolca et al., 2007; Ugolini et al., 2020; Alsaffar et al., 2015]. В случае с донными осадками распределение радиоактивного калия вниз по профилю кернов более равномерное и в среднем содержание  $^{40}K$  лежит в интервале от  $408 \pm 50$  до  $496 \pm 117$  Бк/кг.

Равномерное распределение  $^{40}\text{K}$  вниз по профилю донных осадков говорит о высокой степени его подвижности в окружающей среде и присутствии преимущественно в растворенной форме.

Источником таких природных радионуклидов как  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$  являются горные породы. В результате выветривания горных пород эти радионуклиды мигрируют в почвы, сформированные на этих породах. Распределение  $^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$  для всех почвенных профилей достаточно равномерное и лежит в среднем в интервале от  $46 \pm 11$  до  $94 \pm 13$  Бк/кг и от  $25 \pm 6$  до  $41 \pm 11$  Бк/кг для тория и урана соответственно. Обедненным по урану оказался почвенный разрез П-4, расположенный недалеко от западного побережья озера. Эта местность характеризуется возвышенным участком рельефа относительно других

прилегающих к озеру территорий из-за Пограничного хребта, а почвы обладают высокой степенью каменистости, начиная с глубины 13 см. Самое высокое содержание этих радионуклидов наблюдается в разрезе П-6 – самой южной из исследованных точек. Обеднение может быть связано как с интенсивной миграцией, так и с эрозией, а также с обеднением почвообразующих пород. Для уточнения условий миграции урана необходимо провести дополнительные исследования.

Картины распределения  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$  в донных осадках озера и реки получились схожими между собой. Однако амплитуды колебаний у тория вниз по профилю больше до двух раз относительно урана: если у первого она составила от  $10 \pm 9$  до  $87 \pm 7$  Бк/кг, то у второго от  $10 \pm 1$  до  $45 \pm 4$  Бк/кг.

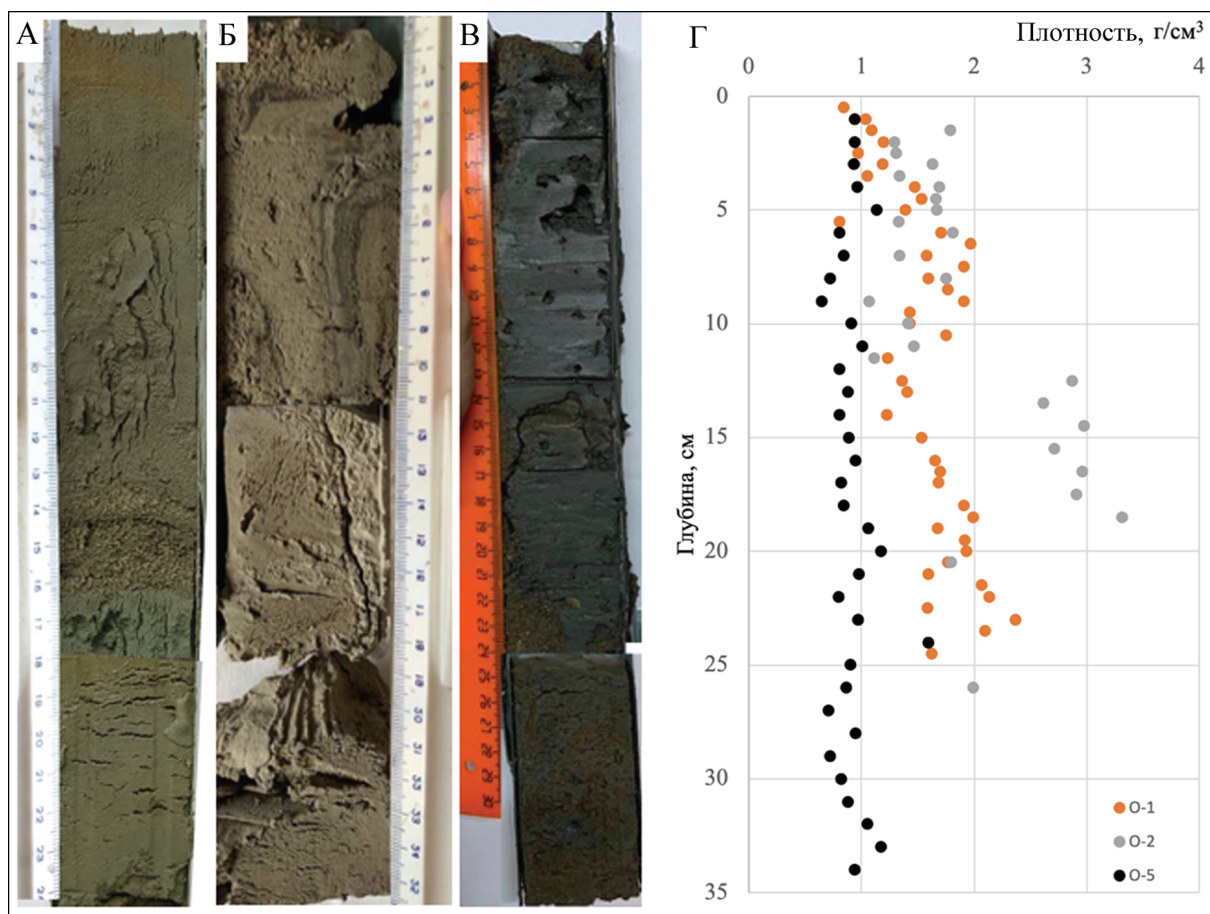


Рис. 2. Керны донных осадков оз. Ханка точек О-1 (А), О-2 (Б) и р. Спасовки О-5 (В) и график плотности их горизонтов (Г)

Fig. 2. Cores of bottom sediments of the Khanka lake O-1 (A), O-2 (Б) and Spasovka river O-5 (B) and a graph of the density of their horizons (Г)

С целью анализа миграционной подвижности изучаемых радионуклидов было проведено сравнение их запасов по профилю почва–река–озеро (рис. 3).

Установлена высокая подвижность  $^{40}\text{K}$  и вынос этого радионуклида как вниз по профилю почв, так и со стоком наносов в оз. Ханка, на что указывает

меньшее содержание этого радионуклида в речных донных осадках (от  $0,16 \pm 0,05$  до  $1,8 \pm 0,04$  кБк/м²) и в почвах (от  $0,1 \pm 0,03$  до  $10,9 \pm 0,4$  кБк/м²) приближенных к реке территорий, по сравнению с донными осадками озера (см. рис. 3А). При этом распределение запасов калия в речных осадках равномерное

с небольшим повышением содержания в верхнем 5-сантиметровом слое. Несмотря на обнаруженное неоднородное распределение запасов  $^{40}\text{K}$  в донных осадках Ханки, озеро является основным местом его аккумуляции (от  $10,4 \pm 0,4$  до  $17,7 \pm 0,70$  кБк/м<sup>2</sup> в

верхних 10 см керна и до  $19,6 \pm 0,80$  кБк/м<sup>2</sup> на глубине 20 см). Минимальное содержание  $^{40}\text{K}$  обнаружено на глубине 15 см –  $6,4 \pm 0,26$  кБк/м<sup>2</sup>. Очевидно, что происходит интенсивный вынос этого радионуклида с сельскохозяйственных угодий в озеро Ханка.

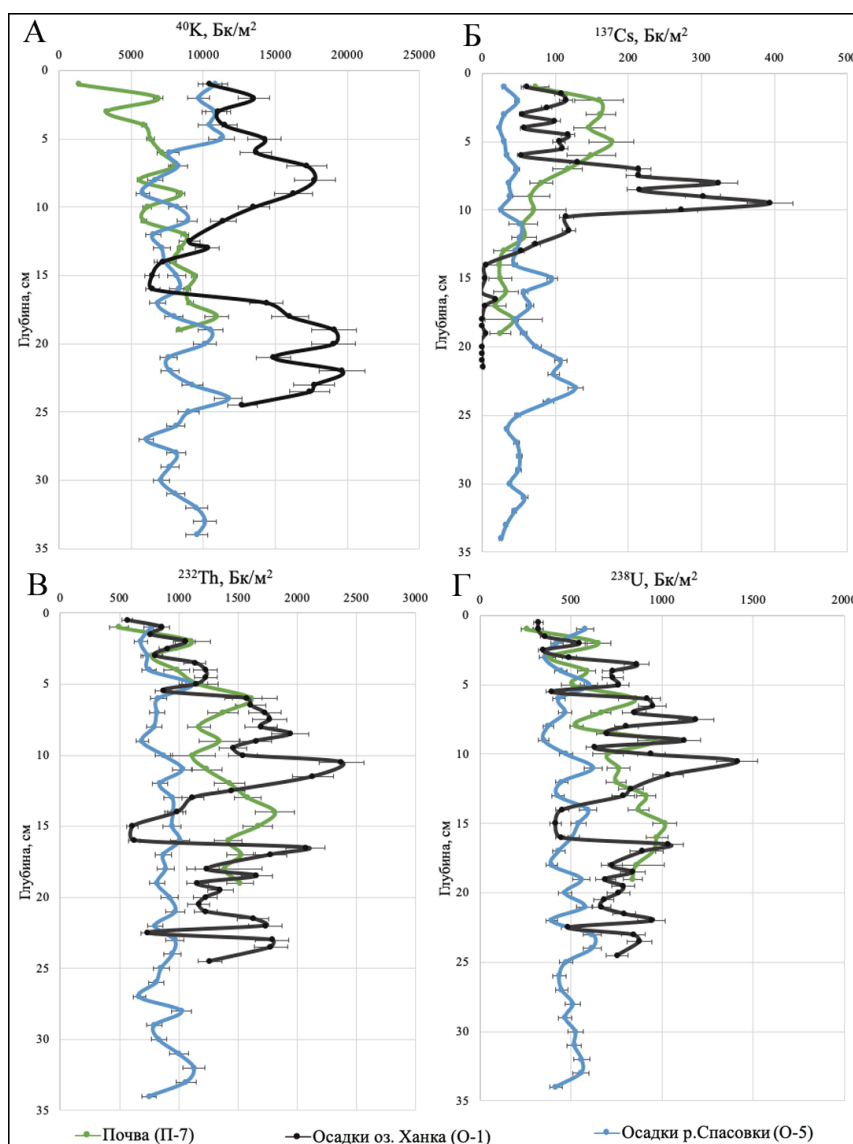


Рис. 3. Внутривертикальное распределение запасов  $^{40}\text{K}$  (А),  $^{137}\text{Cs}$  (Б),  $^{232}\text{Th}$  (В) и  $^{238}\text{U}$  (Г) в почве и донных осадках р. Спассовки и оз. Ханка

Fig. 3. Intra-profile distribution of stocks  $^{40}\text{K}$  (A),  $^{137}\text{Cs}$  (B),  $^{232}\text{Th}$  (B) и  $^{238}\text{U}$  (Г) in soils and bottom sediments of the Khanka lake and Spasovka river

Для  $^{137}\text{Cs}$  установлена слабая степень миграции, на что указывает неравномерное распределение запасов радионуклида в профиле почв и донных осадков озера (см. рис. 3Б). Для почв характерно максимальное накопление радиоцезия в верхних горизонтах около 200 Бк/м<sup>2</sup> на глубине 3–5 см. Для донных осадков озера эти же значения наблюдаются на глубине 10 см, однако, за пределами этого пика содержание радиоцезия в осадках находится на уровне 300–400 Бк/м<sup>2</sup>. Попадая в воды реки, радио-

цезий выносится с током воды в озеро, о чем говорит равномерное распределение его в донных осадках р. Спассовки. Сравнение их суммарных запасов между собой показало увеличение примерно в два раза в озере ( $3,43$  кБк/м<sup>2</sup>) по сравнению с почвой ( $1,51$  кБк/м<sup>2</sup>). Это указывает на сильный вынос цезия из почвы в озеро в результате эрозионных процессов. Полученные данные ниже, чем результаты китайских исследователей, которые оценивают общие запасы  $^{137}\text{Cs}$  в донных осадках озера Ханка как

4,6 кБк/м<sup>2</sup> [Zhang et al., 2022]. Китайскими коллегами установлено, что более 46% цезия поступило в озеро с речным стоком, что указывает на сильную почвенную эрозию с водосбора в последние десятилетия. Также это связывается с созданием озерной фермы на озере Малая Ханка. В 1955 г. была построена ферма озера Синкай, которая ускорила эрозию почвы, превратив водно-болотные угодья в пахотные земли [Zhang et al., 2022], что могло привести к значительному увеличению скорости осадконакопления в период с 1952 по 1964 г. На более активное использование земли со стороны китайской части озера указывают также рассчитанные скорости осадконакопления. Для территории исследования они составляют в среднем 0,08–0,15 см/год, тогда как на китайской стороне – 0,42–0,63 см/год.

Значимый перенос естественных <sup>232</sup>Th и <sup>238</sup>U со стоком речных наносов не обнаружен (см. рис. 3В, Г). Это указывает на то, что миграции естественных радионуклидов со стоком наносов не происходит.

### ВЫВОДЫ

Распределение радионуклидов по профилям почв и донных осадков указывает на однородные условия миграции естественных радионуклидов, обусловленные их содержанием в почвообразующих породах. Фазовый состав всех почвенных кернов в основном представлен пороодообразующими минералами большинства магматических и метаморфических пород.

Удельная активность <sup>137</sup>Cs определила территорию как незагрязненную радионуклидами. Здесь отсутствует влияние каких-либо радиационных катастроф, а уровень цезия определяет только глобальные выпадения. Средние значения содержания радиоцезия в 30-сантиметровой тол-

ще почв всех точек варьировали от 11,1±9,7 до 5,6±7,2 Бк/кг. При этом плотность загрязнения низкая и не превышала 150 Бк/м<sup>2</sup> для всех исследованных профилей.

Установлены фоновые уровни <sup>137</sup>Cs и естественных радионуклидов для почв региона. <sup>137</sup>Cs – 18–177 Бк/м<sup>2</sup>; <sup>238</sup>U и <sup>232</sup>Th – 500–1800 Бк/м<sup>2</sup>; <sup>40</sup>K – 1300–11000 Бк/м<sup>2</sup> соответственно.

Степень вертикальной миграции <sup>137</sup>Cs очень низкая вследствие преимущественно тяжелого гранулометрического состава почв и наличия геохимических барьеров. Распределение естественных радионуклидов <sup>238</sup>U и <sup>232</sup>Th в почвах и донных осадках равномерное, источником являются горные породы, а не речные наносы.

Обнаружено интенсивное вымывание <sup>40</sup>K с водосбора озера Ханка. Этот радионуклид входит в состав калийных удобрений, на что указывает его меньшее содержание в речных донных осадках (от 0,16±0,05 до 1,8±0,04 кБк/м<sup>2</sup>) и в почвах (от 0,1±0,03 до 10,9±0,4 кБк/м<sup>2</sup>) приближенных к реке территорий по сравнению с донными осадками озера (от 10,4±0,4 до 17,7±0,70 кБк/м<sup>2</sup> в верхних 10 см керна и до 19,6±0,80 кБк/м<sup>2</sup> на глубине 20 см). Установлено также активное использование в прошлом сульфатных удобрений на сельскохозяйственных территориях вокруг озера.

Установлено наличие аккумуляции цезийсодержащих наносов в акватории озера, следовательно, в бассейне существуют участки пашни или незакрепленные растительностью отложения, способные поставлять наносы в озеро Ханка в результате действия водной и ветровой эрозии. Выявление их пространственного расположения и объемов выноса материала может являться целью дальнейших исследований.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках гранта РНФ 21-43-00025. Авторы выражают благодарность канд. хим. наук А.М. Егорину и канд. геогр. наук Е.А. Грабенко за помощь в отборе образцов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Грабенко Е.А., Букин И.О., Кузьменкова Н.В. Модернизация озерного бура для отбора ненарушенных морских и озерных отложений различного состава // Геология, география и глобальная энергия. 2022. Т. 4. № 87. С. 122–130. DOI: 10.54398/20776322\_2022\_4\_122.
- Доклад об экологической ситуации в Приморском крае в 2020 году. Правительство Приморского края. Владивосток: 2021. 268 с.
- Иванова И.Н., Антонина А.В., Кислицына Л.В. Химическое загрязнение почв Приморского края как фактор риска для здоровья населения // Санитарный врач. 2022. № 9. DOI: 10.33920/med-08-2209-07.
- Катайкина О.И., Матвеев В.И. Оценка степени загрязнения поверхностных вод рек южного приморья и озера Ханка по гидрохимическим показателям. Актуальные вопросы пресноводной аквакультуры: сб. науч. тр. Астрахань, 2022. № 93. С. 193–202.
- Клышевская С.В. Экологическое состояние почв Приханкайской низменности. Геосистемы северо-восточной Азии: особенности их пространственно-временных структур, районирование территории и акватории. Владивосток: Тихоокеан. ин-т геогр. ДВО РАН, 2019. С. 228–231.
- Коженкова С.И., Юрченко С.Г. Биогенные элементы в воде озера Ханка // Геосистемы Северо-Восточной Азии. Владивосток, 2022. С. 232–236.
- Национальный атлас почв Российской Федерации / под ред. С.А. Шобы. М.: Астрель; АСТ, 2011. 632 с.

- Павлюткин Б.И., Ханчук А.И. Новые данные о возрасте озера Ханка, Дальний Восток России // Доклады РАН. 2002. Т. 382. № 6. С. 826–828.
- Перельман А.И. Геохимия ландшафта. М.: Высшая школа, 1975. 342 с.
- Попова А.Ю., Качур А.Н. Современные проблемы природопользования бассейна озера Ханка (в связи с климатическими и гидрологическими изменениями) // География и геоэкология исследования на Дальнем Востоке. 2019. № 1. С. 96–106.
- Росликова В.И. Современные представления о подводном почвообразовании // Тихоокеанская геология. 2006. Т. 25. № 4. С. 97–103.
- Сойфер В.Н. Радиоэкология северного шельфа Японского моря. Владивосток: Дальнаука, 2002. 254 с.
- Худяков Г.И., Денисов Е.П., Короткий А.М. и др. Юг Дальнего Востока // История развития рельефа Сибири и Дальнего Востока. М.: Наука, 1972. 423 с.
- Alsaffar M.S., Suhaimi Jaafar M., Ahmad Kabir N. et al. Impact of fertilizers on the uptake of  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , and  $^{40}\text{K}$  by pot-grown rice plants, *Pollution*, 2016, vol. 2, iss. 1, p. 1–10, DOI: 10.7508/PJ.2016.01.001.
- Baklanov P.Ya., Kachur A.N., Ermoshin V.V. et al. Current Geo-Ecological Problems Within the Lake Khanka Drainage Basin, *Geog. Nat. Resour.*, 2019, no. 4, p. 325–334.
- Bolca M., Sac M.M., Cokuyul B. et al. Radioactivity in soils and various foodstuffs from the Gediz River Basin of Turkey, *Radiat. Meas.*, 2007, vol. 42, iss. 2, p. 263–270, DOI: 10.1016/j.radmeas.2006.12.001.
- Corbett D.R., Walsh J.P. 210 Lead and 137 Cesium: establishing a chronology for the last century, *Handbook of sea-level research*, Wiley, 2015, p. 361–372, DOI: 10.1002/9781118452547.
- Kiku P.F. Environmental and Hygiene Health Problems in Primorye, *Achievements in the Life Sci.*, 2014, vol. 8, no. 1, p. 16–22, DOI: 10.1016/j.als.2014.06.008.
- Kuzmenkova N.V., Rozhkova A.K., Egorin A. et al. Analysis of sedimentation processes in Lake Khanka (Xingkaihu) and Amur Bay using  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  tracers, *J. Radio-analyt. Nuclear Chem.*, 2023, no. 332, p. 959–971.
- Mikhailovskaya L.N., Molchanova I.V., Pozolotina V.N. et al. Radioactive contamination of the soil-plant cover at certain locations of Primorsky Krai, Sakhalin Island and Kamchatka Peninsula: Assessment of the Fukushima fallout, *J. of Environ. Radioactiv.*, 2017, vol. 172, p. 1–9, DOI: 10.1016/j.jenvrad.2017.02.006.
- Putyrskaya V., Klemt E., Röllin S. et al. Dating of recent sediments from Lago Maggiore and Lago di Lugano (Switzerland/Italy) using  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}$ , *J. Environ. Radioact.*, 2020, vol. 212, 106135, DOI: 10.1016/j.jenvrad.2019.106135.
- Rose N.L. Sediment accumulation rates in European lakes since AD 1850: trends reference conditions and exceedance, *J. Paleolimnol.*, 2011, vol. 45, iss. 4, p. 447–468, DOI: 10.1007/s10933-010-9424-6.
- Semertzidou P., Piliposian G.T., Chiverrell R.C. et al. Long-term stability of records of fallout radionuclides in the sediments of Brotherswater, *J. Paleolimnol.*, 2019, vol. 61, iss. 2, p. 231–249, DOI: 10.1007/s10933-018-0055-7.
- Ugolini R.C.E., Trotti F. Use of Fertilizers in Agriculture: Individual Effective Dose Estimate, *Environments*, 2020, vol. 7, iss. 1, no. 7, DOI: 10.3390/environments7010007.
- Xiangan J. Lake Xingkai/Khanka. Experience and Lessons Learned brief (Lake Basin Management Initiative), 2005, 2010, p. 447–459.
- Zhang S., Yang G., Zheng J. et al. Global fallout Pu isotopes,  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{237}\text{Np}$  records in the sediments of Lake Xingkai and their response to environmental changes in the catchment, *Catena*, 2022, vol. 215, 106276, DOI: 10.1016/j.catena.2022.106276.

Поступила в редакцию 27.06.2023

После доработки 23.10.2023

Принята к публикации 04.12.2023

## NATURAL RADIONUCLIDES AND CESIUM-137 IN SOILS AND BOTTOM SEDIMENTS OF THE KHANKA LAKE

K.V. Savelieva<sup>1</sup>, D. Dzheng<sup>2</sup>, A.K. Rozhkova<sup>3</sup>, D.H. Shlyk<sup>4</sup>, E.A. Tokar<sup>5</sup>, T.A. Vorobieva<sup>6</sup>,  
N.V. Kuzmenkova<sup>7</sup>

<sup>1–3, 6, 7</sup> Lomonosov Moscow State University

<sup>4, 5</sup> Institute of Chemistry Far Eastern Branch RAS, Laboratory of X-Ray analysis

<sup>1</sup> Soil Science Faculty, Department of Radioecology and Ecotoxicology, Master Student; e-mail: universe2910.67@gmail.com

<sup>2</sup> Faculty of Chemistry, Department of Radiochemistry, Master Student; e-mail: zhengzhaogang98@gmail.com

<sup>3</sup> Faculty of Chemistry, Department of Radiochemistry, Ph.D. in Chemistry; e-mail: aleksandra.rozhkova@chemistry.msu.ru

<sup>4</sup> Ph.D. in Chemistry; e-mail: daria79@list.ru

<sup>5</sup> Ph.D. in Chemistry; e-mail: d.edd@mail.ru

<sup>6</sup> Faculty of Geography, Department of Nature Management, Associate Professor;

Ph.D. in Geography; e-mail: tvorobyova@yandex.ru

<sup>7</sup> Faculty of Chemistry, Department of Radiochemistry, Leading Scientific Researcher;

Ph.D. in Geography; e-mail: kuzmenkovav@my.msu.ru

The paper describes the radionuclide composition of soils of the territories around the Khanka Lake and the bottom sediments of the lake and the Spasovka River flowing into the Khanka Lake. The questions of distribution and spatial variability of natural ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ) and artificial ( $^{137}\text{Cs}$ ) radionuclides are discussed. Recently the economic activities in the lake basin have acquired particular importance, as the territory fell under the state program "Far Eastern hectare". So the article emphasizes the importance of studying geo-ecological problems and pollution of the natural environment, as well as the need to take measures to address them. The paper provides a detailed characteristic of soil composition and properties in the vicinity of the Khanka Lake and identifies the conditions of the radial migration of radionuclides. Plains with excessive moisturing and water-retaining horizon are favorable for peat formation (peat horizon can reach 50 cm), which promotes radionuclide migration to deeper horizons. Clay sod-podzolic and podzolic-brown soils of clayey and loamy granulometric composition are formed on higher elevation territories, which on the contrary prevents the migration of radionuclides down the profile. The average content of organic components in soils was found to be 4%. The mineralogical composition of some samples demonstrates the presence of potassium and sodium feldspars, accompanied by calcium langbeinite gypsum phases in the upper layers, indicating the use of salt sulfate mineral fertilizers. The proportion of organic matter in bottom sediments was 2–3%. Background levels of radionuclides in the vicinity of the lake are 18–177 Bq/m<sup>2</sup> for  $^{137}\text{Cs}$ ; 500–1800 Bq/m<sup>2</sup> for  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$ ; 1300–11000 Bq/m<sup>2</sup> for  $^{40}\text{K}$ . There are no signs of the influence of radiation catastrophes on the study area. Intensive leaching of  $^{40}\text{K}$  from the lake catchment by river runoff was detected. The lowest content of  $^{40}\text{K}$  stocks was found in soils and river bottom sediments (up to 1–10 kBq/m<sup>2</sup>) and the highest in lake sediments (8–20 kBq/m<sup>2</sup>).

**Keywords:** specific activity, migration conditions

**Acknowledgments.** The research was financially supported by the Russian Science Foundation (project 21-43-00025). The authors are grateful to A.M. Egorin, Ph.D. in Chemistry, and E.A. Grabenko, Ph.D. in Geography, for their assistance in sampling.

## REFERENCES

- Alsaffar M.S., Suhaimi Jaafar M., Ahmad Kabir N., Nisar A. Impact of fertilizers on the uptake of  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , and  $^{40}\text{K}$  by pot-grown rice plants, *Pollution*, 2016, vol. 2, iss. 1, p. 1–10, DOI: 10.7508/PJ.2016.01.001.
- Baklanov P.Ya., Kachur A.N., Ermoshin V.V. et al. Current Geo-Ecological Problems Within the Lake Khanka Drainage Basin, *Geog. Nat. Resour.*, 2019, no. 4, p. 325–334.
- Bolca M., Sac M.M., Cokuysal B. et al. Radioactivity in soils and various foodstuffs from the Gediz River Basin of Turkey, *Radiat. meas.*, 2007, vol. 42, iss. 2, p. 263–270, DOI: 10.1016/j.radmeas.2006.12.001.
- Corbett D.R., Walsh J.P. *210 Lead and 137 Cesium: establishing a chronology for the last century*, Handbook of sea-level research, 2015, p. 361–372, DOI: 10.1002/9781118452547.
- Doklad ob ekologicheskoi situatsii v Primorskom krae v 2020 godu* [Report on the state of the environment in Primorsky Krai in 2020], Pravitel'stvo Primorskogo kraia, Vladivostok, 2021, 268 p. (In Russian)
- Grabenko E.A., Bukin I.O., Kuz'menkova N.V. Modernizatsiya ozernogo bura dlya otbora nenarushennykh morskikh i ozernykh otlozhenii razlichnogo sostava [Lake drill modernization for sampling the undisturbed marine and lake sediment with different composition], *Geologiya, geografiya i global'naya energiya*, 2022, vol. 4, no. 87, p. 122–130, DOI: 10.54398/20776322\_2022\_4\_122. (In Russian)
- Ivanova I.N., Antonina A.V., Kislytsyna L.V. Khimicheskoe zagryaznenie pochv Primorskogo kraia kak faktor riska dlya zdorov'ya naseleniya [Chemical pollution of soils in Primorsky Krai as a risk factor to population health], *Sanitarnyi vrach*, 2022, no. 9, DOI: 10.33920/med-08-2209-07. (In Russian)
- Kataikina O.I., Matveev V.I. [Evaluation of pollution of surface water of rivers in Southern Primorie and the Khanka Lake using the hydrochemical parameters], *Aktual'nye voprosy presnovodnoi akvakul'tury*, sb. nauch. tr. [Actual issues of fresh-water aquaculture], Astrakhan', 2022, no. 93, p. 193–202. (In Russian)
- Khudyakov G.I., Denisov E.P., Korotkii A.M. et al. *Yug Dal'nego Vostoka, Istoriya razvitiya rel'efa Sibiri i Dal'nego Vostoka* [South of the Far East, History of relief evolution in Siberia and the Far East], Moscow, Nauka Publ., 1972, 423 p. (In Russian)
- Kiku P.F. Environmental and Hygiene Health Problems in Primorye, *Achievements in the Life Sci.*, 2014, vol. 8, no. 1, p. 16–22, DOI: 10.1016/j.als.2014.06.008.
- Klyshevskaya S.V. [Ecological status of soils of the Khanka Lake lowlands], *Geosistemy severo-vostochnoi Azii: osobennosti ikh prostranstvenno-vremennykh struktur, raionirovanie territorii i akvatorii* [Geosystems of North-Eastern Asia: the peculiarities of their spatial temporal structures, zoning of land and waters], 2019, p. 228–231. (In Russian)
- Kozhenkova S.I., Yurchenko S.G. [Biogenic elements in water of the Khanka Lake], *Geosistemy Severo-Vostochnoi Azii* [Geosystems of North-Eastern Asia], Vladivostok, 21–22 aprelya 2022 goda, 2022, p. 232–236. (In Russian)
- Kuzmenkova N.V., Rozhkova A.K., Egorin A. et al. Analysis of sedimentation processes in Lake Khanka (Xingkaihu) and Amur Bay using  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  tracers, *J. Radio-analyt. Nuclear Chem.*, 2023, no. 332, p. 959–971.
- Mikhailovskaya L.N., Molchanova I.V., Pozolotina V.N. et al. Radioactive contamination of the soil-plant cover at certain locations of Primorsky Krai, Sakhalin Island and Kamchatka Peninsula, Assessment of the Fukushima fallout, *J. of Environ. Radioactiv.*, 2017, vol. 172, p. 1–9, DOI: 10.1016/j.jenvrad.2017.02.006.
- Natsional'nyi atlas pochv Rossiiskoi Federatsii* [National Soil Atlas of the Russian Federation], Shoba S.A. (ed.), Moscow, Astrel' Publ., 2011, 632 p. (In Russian)
- Pavljutkin B.I., Hanchuk A.I. Novye dannye o vozraste ozera Hanka, Dal'nij Vostok Rossii [New data about the

- age of the Khanka Lake], *Doklady akademii nauk*, 2002, iss. 382, no. 6, p. 826–828. (In Russian)
- Perel'man A.I. *Geokhimiya landshafta* [Landscape geochemistry], Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1975, 342 p.
- Popova A.U., Kachur A.N. Sovremennye problemy prirodopol'zovaniya bassejna ozera hanka (v svjazi s klimaticheskimi i gidrologicheskimi izmenenijami) [Actual problems of nature management in the Khanka Lake basin (in the context of climate and hydrology changes)], *Geograf. i geoekolog. issledovaniya na Dalnem Vostoke*, 2019, no. 1, p. 96–106.
- Putyrskaya V., Klemm E., Röhlén S. et al. Dating of recent sediments from Lago Maggiore and Lago di Lugano (Switzerland/Italy) using  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}$ , *J. Environ. Radioact.*, 2020, vol. 212, 106135, DOI: 10.1016/j.jenvrad.2019.106135.
- Rose N.L. Sediment accumulation rates in European lakes since AD 1850: trends reference conditions and exceedance, *J. Paleolimnol.*, 2011, vol. 45, iss. 4, p. 447–468, DOI: 10.1007/s10933-010-9424-6.
- Roslikova V.I. Sovremennye predstavleniya o podvodnom pochvoobrazovanii [Modern ideas of subaquatic soil formation], *Tihookeanskaja geologija*, 2006, iss. 25, no. 4, p. 97–103. (In Russian)
- Semertzidou P., Piliposian G.T., Chiverrell R.C., Appleby P.G. Long-term stability of records of fallout radionuclides in the sediments of Brotherswater, *J. Paleolimnol.*, 2019, vol. 61, iss. 2, p. 231–249, DOI: 10.1007/s10933-018-0055-7.
- Soifer V.N. *Radioekologiya severnogo shel'fa Yaponskogo morya* [Radioecology of the northern shelf of the Japan Sea], Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2002, 254 p. (In Russian)
- Ugolini R.C.E., Trotti F. Use of Fertilizers in Agriculture, Individual Effective Dose Estimate, *Environments*, 2020, vol. 7, iss. 1, no. 7, DOI: 10.3390/environments7010007.
- Xiangcan J. *Lake Xingkai/Khanka. Experience and Lessons Learned brief* (Lake Basin Management Initiative), 2005, 2010, p. 447–459.
- Zhang S., Yang G., Zheng J. et al. Global fallout Pu isotopes,  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{237}\text{Np}$  records in the sediments of Lake Xingkai and their response to environmental changes in the catchment, *Catena*, 2022, vol. 215: 106276, DOI: 10.1016/j.catena.2022.106276.

Received 27.06.2023

Revised 23.10.2023

Accepted 04.12.2023