

## РАДИАЦИОННАЯ ОЦЕНКА САПРОПЕЛЕВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ МАЛЫХ ОЗЕР БАРАБИНСКОЙ НИЗМЕННОСТИ И КУЛУНДИНСКОЙ РАВНИНЫ (ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)

© 2022 г. В. Д. Страховенко<sup>а</sup>, \*, Е. А. Овдина<sup>а</sup>, И. Н. Маликова<sup>а</sup>, Г. И. Малов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,  
пр. Академика Коптюга, 3, Новосибирск, 630090 Россия

\*e-mail: strahova@igm.nsc.ru

Поступила в редакцию 17.01.2021 г.

После доработки 17.01.2021 г.

Принята к публикации 20.03.2021 г.

Исследованы различные компоненты озерных систем, расположенных на юге Западной Сибири в разных ландшафтных зонах на содержание естественных и искусственных радионуклидов в соответствии с требованиями ГОСТа. Целью работы является оценка радиационного состояния сапропелевых озерных отложений Барабинской низменности и Кулундинской равнины с учетом их природных особенностей и степени загрязнения в период ядерных испытаний. Установлено, что значения суммарной эффективной удельной активности (Ас) естественных радионуклидов для всех сапропелевых залежей озер значительно ниже нормы (в соответствии с требованиями ГОСТа). В изученных озерах выявлены горизонты в разрезах сапропелевых залежей с превышением глобального фона запасов <sup>137</sup>Cs в сапропелевых залежах в 2 раза и выше. Такие озера пространственно тяготеют к площадным следам радиоактивных выпадений от ядерных испытаний на Семипалатинском полигоне и, несомненно, относятся к озерным системам с первичным загрязнением радиоцезием акватории озера и почв водосбора.

**Ключевые слова:** сапропель, суммарная эффективная удельная активность, естественные радионуклиды, радиоцезий, малые озера, юг Западной Сибири

**DOI:** 10.31857/S0016752522080088

### ВВЕДЕНИЕ

Новые данные о глобальном переносе осадочного вещества внесли существенные изменения в устоявшиеся представления о глобальных законах, управляющих биохемогенными и механогенными процессами континентальной седиментации, что, следовательно, требует дополнительных исследований донных отложений озер комплексом современных аналитических методов (Stein, 2008; Wan et al., 2008; Лисицын, 2014 и др.).

Сапропели образуются в анаэробных условиях в результате физико-химических и биологических преобразований гидробионтов при различной степени участия минеральных и органических компонентов, которые активно взаимодействуют друг с другом (Kemp et al., 1999; Курзо и др., 2010; Страховенко и др., 2016 и др.). Вещественный состав сапропелей может иметь серьезные различия в зависимости от его происхождения, органическая часть отличается в первую очередь соотношением биологического вклада различных организмов в формирование отложений (Страховенко и др., 2014; Серебренникова и др., 2017; Та-

ран и др., 2018 и др.). Терригенные частицы, входящие в состав сапропелевых отложений, по своему составу соответствуют, в основном, горным породам водосборных площадей. Исследуемые озера локализованы, в основном, в юго-восточной части Западно-Сибирской платформы, состоящей из двух ярусов: складчатого фундамента и осадочного чехла. Фундамент выполнен смятыми в складки глинистыми сланцами, известняками, песчаниками, среди которых встречаются магматические породы. На дневную поверхность фундамент выходит вблизи Новосибирска, к востоку он перекрыт осадочным чехлом, мощность которого на западной границе территории достигает 3 км. В полном разрезе осадочного чехла чередуются морские и континентальные отложения юры, мела и палеогена. В конце палеогена вся поверхность исследуемой территории испытывает поднятие и освобождается от морских вод. На освободившейся территории формируется речная сеть, происходит размыв и перенос горных пород из прилегающих районов Алтая. Отложения неогена и четвертичного периодов континентальные. Поверхностные отложения исследуемой

территории представлены суглинками и глинами, оказывающими непосредственное влияние на формирование рельефа, почв, растительного покрова. В неоген-четвертичное время равнинные площади испытывают последнее погружение с различной скоростью: Васюганская, Приобская, Кулундинская и Барабинская, что приводит к замкнутости и бессточности последней, достигшей абсолютных отметок на уровне 100–120 м, что на 20 м уступает абсолютным отметкам первых трех равнин. В четвертичное время ледников на данной территории не было, однако в периоды их таяния в соседних горных районах Алтая увеличивалась мощность водных потоков. Усилился вынос обломков горных пород, продуктов их выветривания и их накопление на равнинах (Объяснительная записка..., 1967). То есть терригенные аллювиально-пролювиальные отложения Западно-Сибирской низменности формируются за счет денудации палеозойских формаций Алтая-Саяна и Казахстана, радиогеохимический уровень которых приближается к уровню, характерному в среднем для континентальной коры. Химический состав сапропелевых отложений определяется не только вкладом обломочного материала, а, в основном, биохеогенными процессами, происходящими в толще воды и в первых сантиметрах донного осадка (Newsome et al., 2014; Страховенко и др., 2018 и др.). Еще одним важным источником привноса вещества с окружающих водоразделов, для малых озер Западной Сибири, где почвенный покров развивается на лессовидных суглинках, приобретает ветровая эрозия почв, особенно сильная в периоды пыльных бурь, участвовавших после распахивания целины (Наливкин, 1969; Гавшин и др., 1999; Шевченко и др., 2012 и др.).

Характеристика вклада биологической составляющей сапропелевых отложений изученных озер дана биологами ИВЭП СО РАН (к. б. н. Н.И. Ермолаева, к. б. н. Е.Ю. Зарубина). В многочисленных публикациях показано, что в большинстве озер продукционные процессы проходили интенсивнее деструкционных, и рассчитана величина поступления в донные отложения органических веществ в результате разложения макрофитов и отмирания зоопланктона. Величина продукции фитопланктона в исследованных озерах изменялась в широких пределах (0.01–1.96 мгО<sub>2</sub>/л в час). В озерах с макрофитогенным типом сапропелеобразования с высокой годовой продукцией фитопланктона (до 2261 г/м<sup>2</sup> в год органического вещества) отмечено наибольшее содержание  $C_{org}$ . Вклад различных групп гидробионтов в формирование донных отложений может значительно различаться, влияя на их химический состав (Зарубина, 2013; Ермолаева и др., 2017; Зарубина и др., 2018; Зарубина, Феттер, 2019; Ермолаева и др., 2019 и др.).

Систематические исследования сапропелей начались в 1916 году по инициативе академиков Н.С. Курнакова и В.И. Вернадского. В 1932 г. создан Сапропелевый институт, выполнен большой объем научно-исследовательских и прикладных работ. В дальнейшем разработка крупных месторождений нефти и газа и производство на их основе продуктов химической переработки приостановили работы по использованию сапропелей и соответственно привели к сокращению исследований. Россия обладает уникальными запасами сапропелевого сырья, которые оцениваются по различным источникам от 38 до 250 млрд м<sup>3</sup> (Штин, 2005), однако их изученность находится на уровне всего 2%. В результате современных технологических решений, позволяющих высокоэффективно использовать сапропели, а также жидкие и твердые продукты их переработки в различных отраслях экономики снова возрос интерес к их использованию, в том числе за счет месторождений Западной Сибири. Важно также, что удаление сапропелей из водоемов способствует улучшению качества воды и условий рыбозаведения.

Для использования сапропелей в различных отраслях народного хозяйства они должны соответствовать требованиям различных ГОСТов. По ГОСТу 54000-2010 требуется соответствие сапропелевого сырья радиационно-гигиеническим нормативам по активности естественных и искусственных радионуклидов.

Вследствие проведенных испытаний на Семипалатинском и Новоземельском ядерных полигонах, начиная с 1949 г., а также учитывая аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. и на АЭС Фукусима-1 в 2011 г., практически на всей изучаемой территории Западной Сибири встречаются участки, где региональный техногенный радиационный фон превышает глобальный в несколько раз (Израэль, 2000; Сухоруков и др., 2001; Израэль, 2005; Рихванов, 2009 и др.). В качестве индикатора (маркера) радиоактивного загрязнения и уровня радиационного воздействия, как в России, так и за рубежом используется <sup>137</sup>Cs, техногенный долгоживущий радионуклид с периодом полураспада 30.2 г., образующийся при ядерных взрывах, а также функционирования АЭС, относительно устойчивый (слабо мигрирующий) в почвах и сравнительно легко определяемый существующими аналитическими методами. В России нормируемым показателем загрязнения являются удельная активность (Бк/кг) и плотность выпадения (запас) <sup>137</sup>Cs в почве в мКи/км<sup>2</sup>, характеризующие современное радиационное состояние территории и служащие основой для реконструкции накопленных эффективных доз облучения (сЗв) (Мясников, 2004). Для территории Западной Сибири (степные, лесостепные и предгорные ланд-

шафты) путем экспертной оценки многих архивных, расчетных и экспериментальных (измерения содержаний  $^{137}\text{Cs}$  в почвах) данных получена величина глобального фона активности  $^{137}\text{Cs}$  в почвах, равная  $50 \text{ мКи/км}^2$  ( $1,85 \text{ кБк/м}^2$ ) на 1995 год (Баранов, 1956; Болтнев и др., 1972; Алексахин, 1982; Черняго и др., 2004; Медведев и др., 2005 и др.). Заметим, что в глобальных выпадениях на территории Сибири есть небольшая доля (не более 10%) Чернобыльского радиоцезия, о чем можно судить по соотношению активностей  $^{137}\text{Cs}/^{134}\text{Cs}$  (Гавшин и др., 2000; Сухоруков и др., 2001). В более ранних публикациях данные по запасам радиоцезия приводятся во внесистемных единицах активности радиоцезия (Ки), в том числе и в тех, которые активно цитируются в работе, поэтому и в этой статье запасы радиоцезия приведены в  $\text{мКи/км}^2$ , для пересчета в  $\text{кБк/м}^2$  следует использовать формулу  $1 \text{ Ки/км}^2 = 37 \text{ кБк/м}^2$  (Павлоцкая, 1974; Моисеев, 1975; Израэль, 2000; Михайловская и др., 2015 и др.). В статье 2000 г. и в материалах 2005 г. академик Ю.А. Израэль опубликовал карту запасов  $^{137}\text{Cs}$  ( $\text{мКи/км}^2$ ) в пересчете на 2000 год и показал, что глобальный радиационный мониторинг проведенный в 1990х гг., при помощи аэрогаммаспектральной съемки с практически повсеместным пробоотбором, выявил, что существует широтная зональность в распределении загрязнения  $^{137}\text{Cs}$ . За счет выполнения большей части ядерных взрывов в северном полушарии и особенностей атмосферной циркуляции, связанной с существенно более медленной скоростью меридионального перемещения по сравнению с широтной, максимальные значения глобального радиационного фона приходятся на широтные пояса  $40^\circ\text{--}50^\circ$  и  $50^\circ\text{--}60^\circ$  с.ш. (для широтного пояса  $50^\circ\text{--}60^\circ$  с.ш. радиационный фон, обусловленный  $^{137}\text{Cs}$ , варьирует в диапазоне  $18\text{--}54 \text{ мКи/км}^2$  ( $0,4\text{--}2,0 \text{ кБк/м}^2$  в пересчете на 2012 г. (Усачева, 2017)), к северу и югу от них значения уменьшаются (Израэль и др., 2000; Израэль, 2005).

Установлена мозаичность распределения радиоцезия для локальных и региональных атмосферных выпадений, обусловленная как неравномерностью первичных радиоактивных выпадений, так и вторичным перераспределением (Сухоруков и др., 2001; Маликова и др., 2011 и др.).

Целью работы является оценка радиационного состояния сапропелевых озерных отложений Барабинской низменности и Кулундинской равнины юга Западно-Сибирского региона с учетом их природных особенностей и степени загрязнения в период ядерных испытаний.

## ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования являются сапропелевые залежи малых озер Барабинской низменности и Кулундинской равнины. В Барабинской низменности и Кулундинской равнине насчитывается более 5000 озер общей площадью свыше  $8000 \text{ км}^2$ . Преобладают бессточные озера, господствующее положение занимают малые водоемы (97.5%) размером до  $2.5 \text{ км}^2$ . Работа базируется на фактическом материале, собранном авторами в сотрудничестве с исследователями Института водных и экологических проблем СО РАН, Института катализа СО РАН, Института почвоведения и агрохимии СО РАН в комплексных экспедициях в период с 2012 по 2019 гг.

Для Барабинской низменности и Кулундинской равнины характерен своеобразный гривный рельеф, генетически связанный с суффузионно-дефляционными процессами. Вследствие местного перераспределения влаги и перетока ее с водоразделов грив в межгривные долины (чередование параллельно простирающихся с ЮЗ на СВ удлиненных повышений (грив) и понижений), в понижениях расположены многочисленные озера. Территория сложена лессовыми отложениями от тяжелосуглинистых и глинистых на севере до средне- и легкосуглинистых и супесчаных на юге. Содержание карбонатов составляет от 1 до 15% (Сысо, 2007). Котловины исследуемых озер расположены в пределах современных четвертичных отложений, представленных озерно-аллювиальными суглинками с прослоями песков, аллювиальными песками, озерно-аллювиальными глинами и суглинками (Объяснительная записка..., 1967). Следует отметить, что лессовидные суглинки, которые распространены в Барабе и Кулунде, покрывающие слоем от 0.2 до 1.5 м и более гривовообразные и увалообразные возвышения, имеют эоловый генезис. Это является причиной значительного выравнивания гранулометрического и химического составов почвообразующих пород и почв. В формировании озерного сапропеля почвенный покров играет роль источника органического материала и водорастворимых солей, которые попадая вместе с поверхностными и почвенно-грунтовыми водами в озеро, аккумулируются на его дне. Состав пород и почв определяет наличие большого количества вод содового типа на всей территории. Состав пород и почв водосборных территорий исследуемых озер детально изучен и опубликован в научных статьях А.И. Сысо, А.В. Пузанова с коллегами, (Сысо, 2007; Пузанов и др., 2016; Пузанов и др., 2017 и др.). Для оценки почвенно-геохимических особенностей водосборной площади озер были заложены почвенно-геохимические профили, охватывающие основные геоморфологические элементы (пойма, озерная терраса, водораздел озерной котловины), и от-

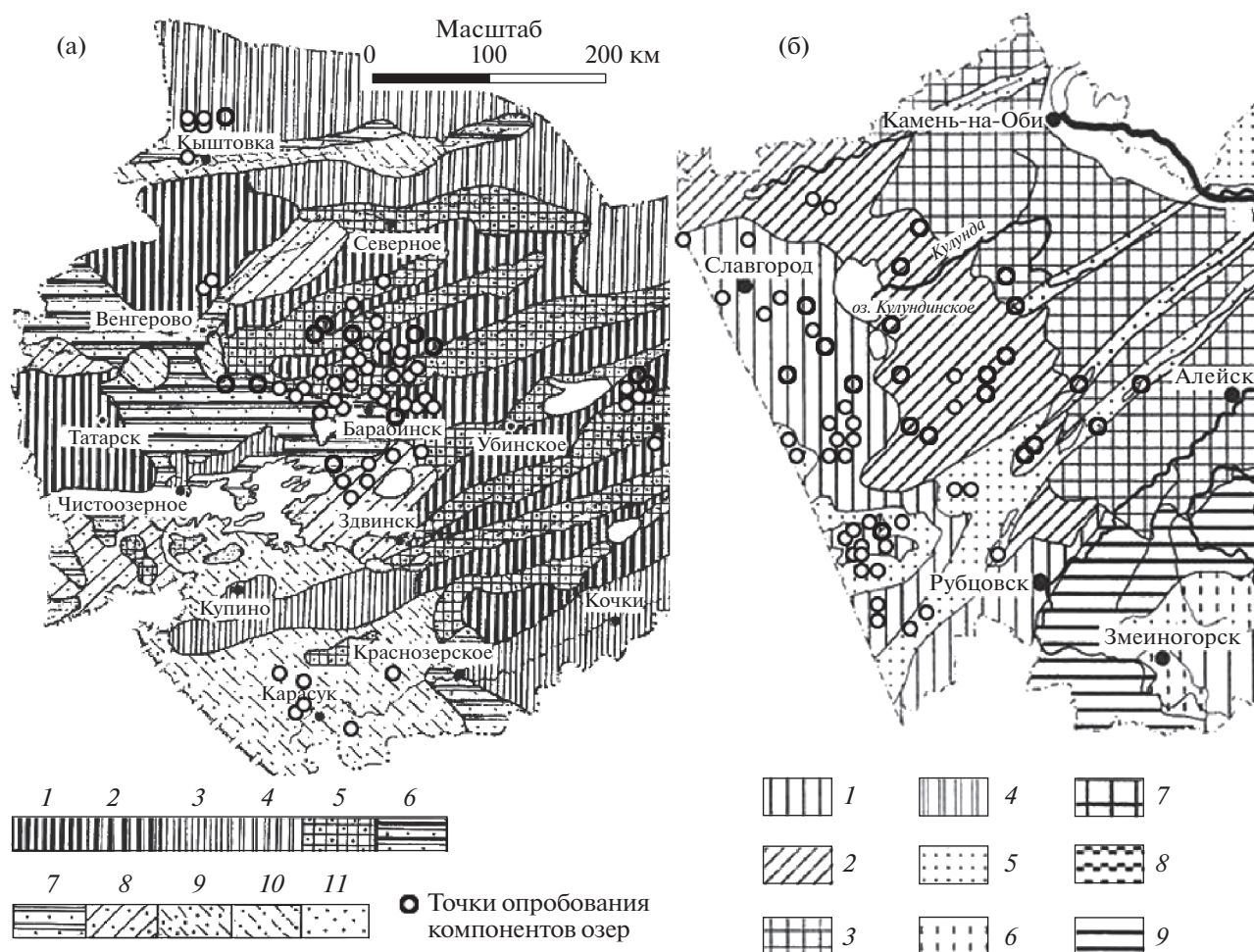
бор проб почвенных разрезов с определением почвенных горизонтов выполнен к. б. н. Ю.В. Ермоловым (ИПА СО РАН) и к. б. н. А.В. Салтыковым (ИВЭП СО РАН). Изученные озера Барабинской низменности расположены в основном в *лессостепной ландшафтной зоне*. Структура почвенного покрова в водосборных бассейнах озер представляет собой концентрическое распределение сменяющих друг друга почвенных типов: болотная → лугово-болотная → луговая → лугово-черноземная → чернозем южный или обыкновенный → серая лесная. Количество и качество поступающего материала в озеро зависит от содержания в почвенном покрове гумусовых соединений, тонкодисперсных частиц и ионов водорастворимых соединений. Содержание гумусовых соединений в верхней части профиля исследуемых почв колеблется в широких пределах, даже в пределах одного водосборного бассейна, степень их гумусированности меняется от низкой (0.9%) до высокой (8.3%). Изученные почвы имеют высокую водопроницаемость, низкую водоподъемную способность и влагоемкость. По степени засоления в исследуемых водосборных бассейнах все почвы можно разделить на незасоленные (черноземы обыкновенные и южные, луговые дерново-глеевые, лугово-болотные перегнойные, серые лесные типичные), слабозасоленные (лугово-черноземные солонцеватые, болотные перегнойно-глеевые, луговые перегнойные, луговые дерновые) и сильнозасоленные (лугово-болотные перегнойно-глеевые). Кислотно-щелочные условия в почвенном покрове исследуемых водосборных бассейнов изменяются в широком диапазоне значений pH: от слабокислых в верхней части луговых дерновых почв в окрестностях оз. Цыбово до сильнощелочной в нижней части профиля лугово-черноземных солонцеватых почв. Карбонаты встречаются во всех исследуемых почвах, кроме серых лесных типичных в бассейне оз. Большие Кайлы, и приурочены в основном к нижним горизонтам. Почвы водосборных площадей озер Кулундинской равнины типичны для степной ландшафтной зоны: осолоненные, содержащие малое количество органического вещества, имеющие высокую плотность. На изученной территории встречаются такие типы почв, как: *солончаки* (соровые, луговые, лугово-болотные) и *лугово-степные солонцеватые, луговые солончаковатые почвы* вблизи озер, *подзолы и дерново-подзолы иллювиально-железистые* в подзоне ленточных боров, а также темно-каштановые солонцеватые почвы (Пузанов и др., 2016, 2017; Овдина и др., 2016 и др.). Расположение изученных озер в этих районах вынесено на карты-схемы почвенного покрова и породообразующих пород, опубликованных в публикациях (Никольская, 1961; Почвы, 1966; Ильин, Сысо, 2001) (рис. 1). Авторами статьи в более ранних публикациях показано, что содержания есте-

ственных радионуклидов в различных типах почв юга западной Сибири в разных ландшафтных зонах близки (Страховенко и др., 2010; Страховенко, 2011; Мельгунов и др., 2011; Malikova, Strakhovenko, 2017).

Ранее авторами детально изучена геохимия сапропелевых отложений (Страховенко и др., 2014; Страховенко и др., 2016; Страховенко и др., 2019 и др.). Установлено, что органическая часть сапропелей отличается соотношением вклада биологических видов организмов. Согласно данным рентгеноструктурного анализа, минеральная составляющая представлена довольно постоянным набором основных минералов: кварц, плагиоклаз, калиевый полевой шпат, слюды, кальцит. В качестве второстепенных минералов присутствуют: пирит, гидрослюда, хлориты, доломит и акцессорные минералы: ильменит, гематит, циркон, монацит, магнетит, апатит, рутил, титанит и др. Исследования, проводившиеся нами ранее на данных территориях, показали, что содержание Si, входящего в состав кварца и других породообразующих минералов, а также диатомовых створок, остатков макрофитов, могут изменяться в широком диапазоне. Содержания Al, K, Na изменяются пропорционально, что, скорее всего, отражает их единый источник (Страховенко и др., 2014). Скорости осадконакопления в малых сапропелевых озерах различных регионов Сибири, рассчитанные с использованием изотопов  $^{210}\text{Pb}$  и  $^{137}\text{Cs}$ , составляют 0.15–0.35 см/г. (Strakhovenko et al., 2017).

С учетом разных подходов к классификации сапропелей (Кордэ, 1969; Лопотко, 1978; Штин, 2005; Курзо и др., 2010 и др.) в данной работе к сапропелевым залежам отнесены органоминеральные донные отложения с зольностью до 85%. Нами на основе минерально-геохимических и биогенетических данных проведена классификация исследованных органоминеральных донных отложений по их составу. По зольности сапропелевые отложения разделены на четыре **типа** — *органогенный* с зольностью до 30%; *органоминеральный* — 30–50%; *минерально-органогенный* — 50–70%; *минерализованный* — 70–85%. ДО со значением зольности выше 85% относятся к *минеральным илам* (Штин, 2005; Курзо и др., 2010 и др.). Авторы статьи все типы сапропелей, кроме органогенного, на основе минералого-геохимических данных по соотношению Si/Ca подразделили еще на три **класса**: *кремниевый* ( $\text{Si} > \text{Ca}$ ); *кальциевый* ( $\text{Ca} > \text{Si}$ ), *смешанный* ( $\text{Si} \sim \text{Ca}$ ). На основе доминирующего типа продукции они разделены на планктонный, макрофитный и планктоно-макрофитный.

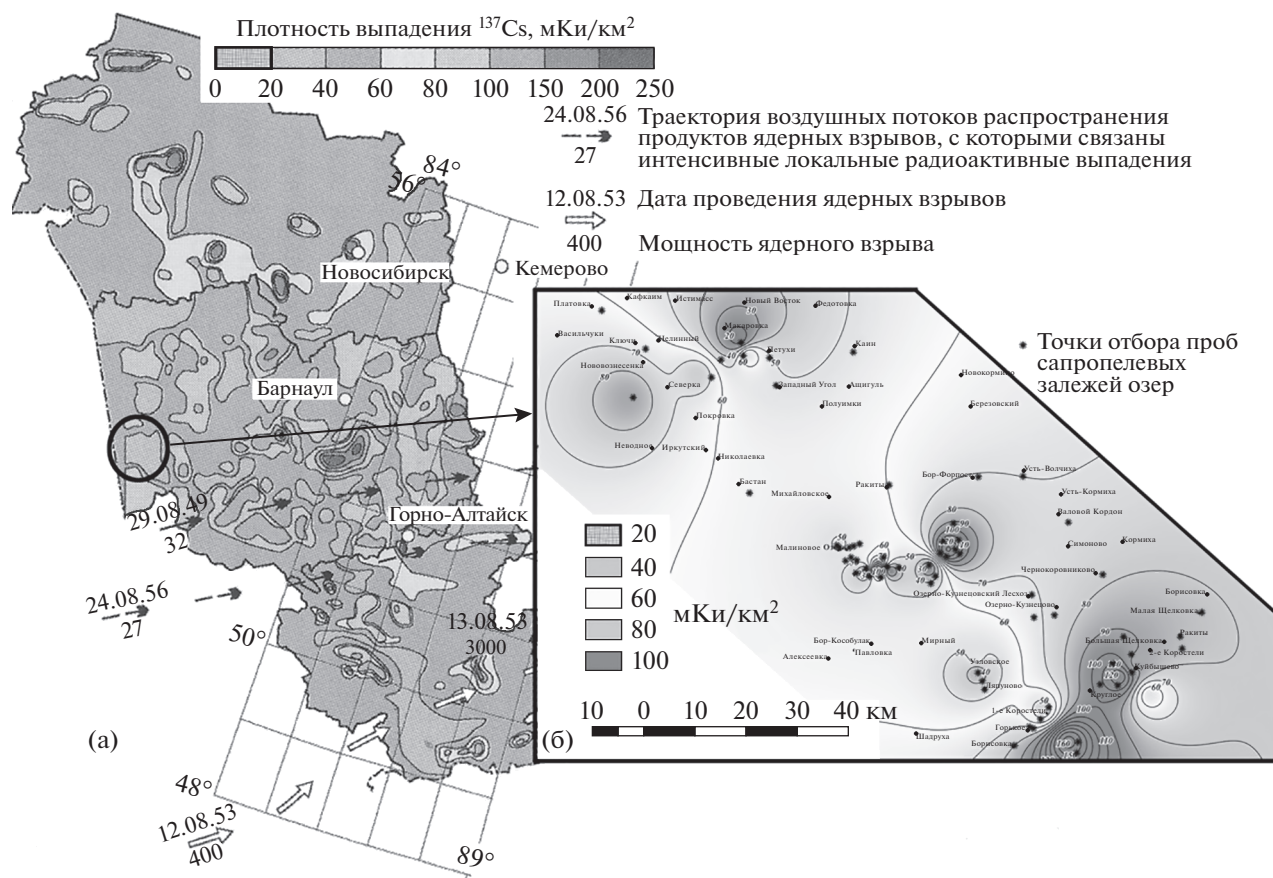
Территория юга Западной Сибири была подвержена влиянию радиоактивных выпадений в период ядерных испытаний на Семипалатинском и Новоземельском полигонах. Карта выхода Се-



**Рис. 1.** Карты-схемы гранулометрического состава почв и почвообразующих пород Барабинской низменности (Почвы, 1966) (а) и почвенно-географического районирования Кулундинской равнины [Никольская, 1961] (б) с вынесенными точками опробования компонентов озерных систем: (а) 1 – лессовидные тяжелые суглинки и легкие глины пылевато-иловатые; 2 – лессовидные тяжелые суглинки пылеватые и пылевато-иловатые; 3 – лессовидные средние, реже тяжелые суглинки иловато-пылеватые; 4 – тяжелые суглинки, реже глины иловато-пылеватые; 5 – тяжелые суглинки и глины пылевато-иловатые и иловато-песчаные; 6 – тяжелые и средние суглинки песчано-иловатые и иловато-песчаные; 7 – средние суглинки песчанисто-пылеватые и пылевато-песчаные; 8 – средние и легкие суглинки иловато-песчаные и пылевато-песчаные; 9 – легкие суглинки, реже супеси иловато-песчаные; 10 – супеси песчаные; 11 – пески связные; (б) 1 – каштановые почвы; 2 – черноземы южные; 3 – черноземы обыкновенные; 4 – черноземы выщелоченные и серые лесные почвы; 5 – дерново-подзолистые почвы древних борových террас; 6 – черноземы типичные; 7 – черноземы оподзоленные и темно-серые лесные почвы; 8 – слаборазвитые горно-луговые почвы; 9 – черноземы южные предгорных областей.

мипалатинских ядерных следов на территорию Западной Сибири свидетельствует о влиянии на районы Барабы и Кулунды, главным образом, взрывов 1953, 1954 гг. (Селегей, 1997). В Кулунде выпадения из атмосферы суммарной бета-активности за год в 1961–1963 гг. составили 605–1584 мКи/км<sup>2</sup> (Робертус, 1993). В настоящее время авторы располагают самой большой базой данных по аналитическим характеристикам сапропелевых залежей Барабинской низменности и Кулундинской равнины, полученными нами в ходе исследований и обобщений литературных данных, опубликованных до 2018 г. Авторами, в составе большой группы ученых ранее проведено

опробование почв территорий юга Западной Сибири и построены карты плотности загрязнения радиоцезием почв Барабинской низменности и Кулундинской равнины, опубликованные в серии научных работ (Рихванов, 2009; Маликова, Страховенко, 2011; Мельгунов и др., 2011 и др.). На рис. 2 приведена карта плотности выпадения <sup>137</sup>Cs в почвах на юге Западной Сибири (построена с использованием данных авторов), опубликованная в монографии Л.П. Рихванова (Рихванов, 2009) и пример карты плотности выпадения <sup>137</sup>Cs в сапропелевых отложениях озер Танатарской и Ключевской систем более крупного масштаба, построенных авторами для каждой системы озер



**Рис. 2.** Карта плотности выпадения  $^{137}\text{Cs}$  в почвах на юге Западной Сибири (построена с использованием данных авторов) (Рихванов, 2009) (а) и карта плотности выпадения  $^{137}\text{Cs}$  в донных отложениях озер Танатарской и Ключевской систем (б).

Барабинской низменности и Кулундинской равнины отдельно (рис. 2).

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Во время полевых работ произведен отбор керн донных отложений, почвенных профилей, проб почвообразующего субстрата, воды и образцов доминирующих видов растений. Отбор проб воды на все анализы производился по стандартным методикам (ГОСТ 31861, 2012). Определены переменные физико-химические параметры вод и донных отложений. Для определения генезиса, формирующегося в разных озерах сапропеля, отобраны пробы первичного сапропелеобразующего материала (фитопланктон, фотосинтетические пигменты, зоопланктон, фитобентос и фитоперифитон, макрофиты, укусы на биомассу, геоботанические описания). Озера значительно различаются по степени и характеру зарастания макрофитами, а также уровню продуктивности водных фитоценозов. Поток автохтонного органического вещества составлял в изученных озерах от 3.2% в гипергалинном озере Малиновом (в

котором основу седиментационного потока составляет аллохтонный галит) до 84.2% (в озерах с автохтонным типом накопления вещества, Барчин, Качкульня и др.) от общей массы седиментационного потока. Максимальные значения продукции и деструкции наблюдались в озерах, где отмечалось массовое развитие сине-зеленых водорослей. На определения гамма спектрометрическим методом отбирались основные продуценты органического вещества для каждого озера. Например, для озер с массивно-зарослевым типом зарастания макрофитами, отбиралась доминирующая погруженная растительность (роголистник погруженный, телорез, харовая водоросль, либо полупогруженная растительность (тростник южный). В озерах бордюрного типа зарастания анализировалась доминирующая жесткая воздушно-водная растительность. Во многих озерах анализировались несколько проб доминирующей биомассы, в дальнейшем при различных расчетах использовалось арифметическое среднее по этим пробам.

Отбор почвенных проб осуществлялся металлическим кольцом на глубину почвенного разреза. Опробование почв проводилось послойно за-

точным металлическим кольцом (диаметр (82 мм) и высота (50 мм)). Для каждого конкретного почвенного разреза использовалась схема непрерывного опробования кольцом верхних 30 см, а далее по генетическим горизонтам. Это позволяло определять активность радиоцезия послойно, что особенно важно для выделения дернового горизонта и верхней части гумусо-аккумулятивного горизонта А, которые депонируют наибольшее его количество. Полученные значения удельной активности радиоцезия в Бк/кг затем пересчитывались на плотность загрязнения (мКи/км<sup>2</sup>) (Маликова, Страховенко, 2011).

Мощность отложений сапропеля определялась непосредственным зондированием (эхолотом). При помощи цилиндрического пробоотборника с вакуумным затвором конструкции НПО «Тайфун», Россия (диаметр 82 мм, длина 120 см), отбирались керны донных отложений с катамарана. Керн донных отложений опробовался послойно с шагом от 5 см до 25 см, в зависимости от его состава, с отбором проб минерального ила котловины озера. По всем пробам выполнены общетехнические анализы (влажность, зольность, состав неорганической и органической частей сапропеля). Изучение морфологии, фазового состава образцов донных отложений различных классов проводилось с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) TESCAN MIRA 3 (Tescan, Чехия), снабженного энергетическим спектрометром «OXFORD XMAX 450+» (Oxford Instruments, Великобритания).

Естественные радионуклиды и радиоцезий определялись гамма-спектрометрическим методом на гамма-спектрометрах с колодезными сцинтилляционными кристаллами NaI(Tl) размерами 200 × 200 и 150 × 150 мм. Вес анализируемых образцов варьировал от 100 до 450 г. Чувствительность (предел обнаружения) при массовом анализе оценивается величиной порядка 1–3 Бк/кг. Точность и воспроизводимость анализов определялись с использованием эталонных образцов SA-1, SI-1 и байкальского ила БСИЛТ (7126-94). Правильность определения естественных радионуклидов оценивалась в сравнении с данными для стандартных образцов МАГАТЭ. Лаборатория ранее успешно принимала участие в их сертификации. Параллельные образцы почв и донных отложений использовались для оценки воспроизводимости: каждый 10-й образец дублировался и анализировался в строгом соответствии с методикой. По данным статистической обработки 70 проб донных отложений с содержанием органического вещества от 75 до 25%, проанализированных двумя и более методами, отклонение по величине активности <sup>226</sup>Ra составило не более 15%, тория и калия – 10%. Подробное описание метода анализа приводится в работах (Gavshin et al., 2004;

Мельгунов и др., 2011; Malikova, Strakhovenko, 2017).

Чтобы оценить соответствие сапропелей радиационно-гигиеническим нормативам, вычисляется суммарная эффективная удельная активность (Ас) от естественных радионуклидов по формуле (с учетом коэффициентов):  $A_c = A_{Ra} + 1.31 A_{Th} + 0.085 A_K^1$ , где  $A_{Ra}$ ,  $A_{Th}$ ,  $A_K^1$  – удельные активности соответствующих радионуклидов. Норма значений Ас для естественных радионуклидов составляет не более 300 Бк/кг, а для техногенных – не более 1 относительной единицы, которая составляет величину глобального фона (ГОСТ Р 54519, 2011).

Анализы выполнены научными сотрудниками аналитического центра ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН. Данные по удельной активности радиоцезия пересчитаны с учетом радиоактивного распада на 2010 год и введены в базу данных. Статистическая обработка данных анализов, включающая оценку параметров распределения радионуклидов в почвах, сапропелевых залежах, биоте, проверку гипотез о виде распределения, оценку корреляций, производилась при помощи программного продукта Статистика (Statistica 8), а также средствами MS Excel. Для наглядности компоновки полученных аналитических данных по всему массиву содержаний элементов в донных отложениях, и почве применен кластерный анализ (Михайльчук и др., 2006). Для расчета использовалась матрица  $m \times n$  ( $n$  – пробы донных осадков, биоты или почв;  $m$  – количество факторов или переменных (Ca, Mg, Na, Al, Fe, Si, U(Ra), Th, K). Число переменных в решениях изменялось с целью обнаружения устойчивых связей между переменными и получения устойчивых групп озер. Расчет произведен для R-анализа – факторы (химические элементы). В R-анализе метрикой является коэффициент корреляции. Решения оформлены в виде дендрограмм корреляционных связей химических элементов в заданной совокупности объектов. Для исследуемых озер с помощью программных пакетов QGIS и ArcGIS построены модели послойного площадного распределения запасов <sup>137</sup>Cs мКи/км<sup>2</sup> и суммарной эффективной удельной активности (Ас) естественных радионуклидов в сапропелях, почвах водосборных площадей для различных озерных систем разных районов Барабинской низменности и Кулундинской равнины. Пример приведен на рис. 2.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные новые материалы в совокупности с предыдущим массивом данных по почвенным профилям, и новые данные по сапропелевым отложениям, биомассе из водной толщи озер Бара-

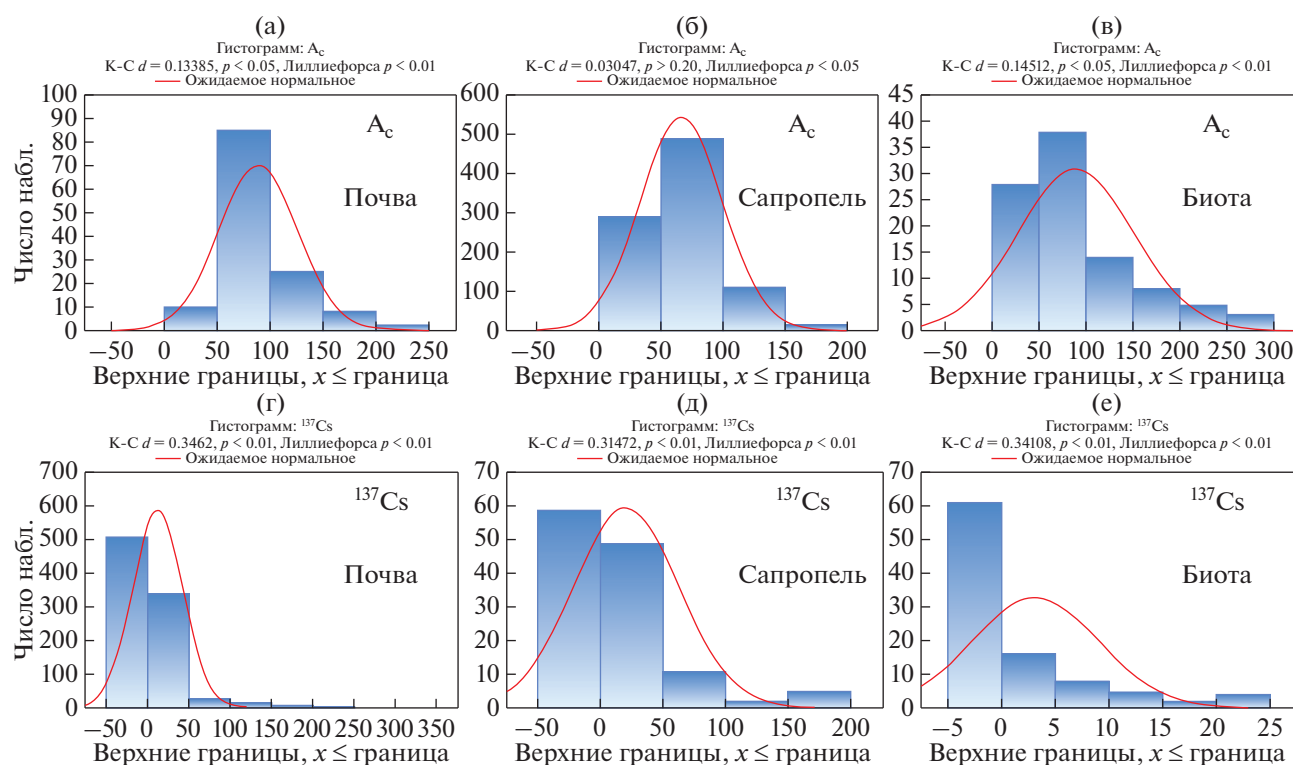
**Таблица 1.** Статистические параметры геохимических данных по удельной активности естественных радионуклидов и  $^{137}\text{Cs}$  (Бк/кг) различных компонентах озерных систем Барабинской низменности (52 озера) и Кулундинской равнины (41 озеро)

| Переменные                                | Среднее | Минимальное значение | Максимальное значение | Стандартное отклонение | Асимметрия | Эксцесс |
|-------------------------------------------|---------|----------------------|-----------------------|------------------------|------------|---------|
| Почва (2137 проб)                         |         |                      |                       |                        |            |         |
| Удельная активность Ra                    | 29      | 1                    | 112                   | 11                     | 0.7        | 1.0     |
| Удельная активность Th                    | 19      | 1                    | 59                    | 22                     | 2.4        | 5.9     |
| Удельная активность K                     | 438     | 10                   | 751                   | 146                    | 0.6        | 1.6     |
| Суммарная эффективная удельная активность | 89      | 3                    | 234                   | 37                     | 1.2        | 3.3     |
| Удельная активность $^{137}\text{Cs}$     | 20      | 0                    | 198                   | 42                     | 2.9        | 8.4     |
| Биота (112 проб)                          |         |                      |                       |                        |            |         |
| Удельная активность Ra                    | 32      | 1                    | 156                   | 28                     | 2.0        | 5.2     |
| Удельная активность Th                    | 12      | 1                    | 152                   | 18                     | 5.0        | 35.4    |
| Удельная активность K                     | 470     | 10                   | 1720                  | 432                    | 1.0        | 0.1     |
| Суммарная эффективная удельная активность | 90      | 2                    | 264                   | 62                     | 1.2        | 0.8     |
| Удельная активность $^{137}\text{Cs}$     | 3       | 0                    | 24                    | 6                      | 2.1        | 4.0     |
| Сапропелевые отложения (3956 проб)        |         |                      |                       |                        |            |         |
| Удельная активность Ra                    | 26      | 1                    | 143                   | 16                     | 1.8        | 7.0     |
| Удельная активность Th                    | 15      | 1                    | 58                    | 10                     | 0.7        | 0.2     |
| Удельная активность K                     | 248     | 10                   | 870                   | 176                    | 0.4        | 0.4     |
| Суммарная эффективная удельная активность | 66      | 3                    | 187                   | 33                     | 0.5        | 0.5     |
| Удельная активность $^{137}\text{Cs}$     | 12      | 0                    | 342                   | 31                     | 4.8        | 30.4    |

бинской низменности и Кулундинской равнины показали, что, несмотря на весьма значительную вариацию содержаний урана (по радио), тория и калия в выборках, изменение средних значений по почвенным разрезам и колонкам донных отложений невелико (табл. 1). Этот факт, очевидно, свидетельствует об однородности их содержаний в почвообразующем субстрате, являющимся источником их поставки сначала в почвы, а далее в сапропелевые отложения. На самой ранней стадии формирования озер донные отложения формируются на своем минеральном субстрате. В этот период времени, когда еще не сформирован рельеф, происходят активные процессы выработки рельефа водосборной площади. В малых озерах Сибири данный слой залегает в самом низу колонок донных отложений, имеет незначительную мощность в основном это 2–6 см, при общей мощности осадков от 3 до 29 м. Со временем система уравнивается и основная масса образования осадкообразующего материала связана с процессами переноса осадочного материала с водосборного бассейна в озера текучими водами и воздушными потоками (аллохтонное вещество), а также с образованием аутигенного органиче-

ского и минерального вещества в результате жизнедеятельности гидробионтов (автохтонное вещество). В изученных почвенных разрезах содержания естественных радионуклидов соответствуют их значениям в лессовидных суглинках. Проведена статистическая обработка геохимических данных по содержанию естественных радионуклидов и  $^{137}\text{Cs}$  в почвах, сапропелевых отложениях и биоте. Результаты показывают, что для всех радионуклидов характерно нормальное или логнормальное распределение (рис. 3). Логнормальное распределение свидетельствует о небольшом вкладе образцов с повышенным радиационным фоном.

Содержания Th и K в сапропелевых залежах озер, в целом, соответствуют данным по почвам водосборных площадей и в основном ниже, чем в почвах. Содержания урана в донных осадках всех изученных озер ниже или равны содержаниям в почвах водосборных площадей этих озер, за редким исключением некоторых озер степной и таежной зоны. Исключения составляют некоторые содовые озера с высоким pH вод (более 9), в которых происходит увеличение содержаний урана в сапропелевых залежах. Обеднение калием сапропелевых залежей, скорее всего, связано с выщелачиванием калия из осадков.



**Рис. 3.** Гистограммы распределения значений суммарной эффективной удельной активности ( $A_c$ ) (Бк/кг) от естественных радионуклидов (а, б, в) и  $^{137}\text{Cs}$  (г, д, е) в почвах, сапропелях и биоте.

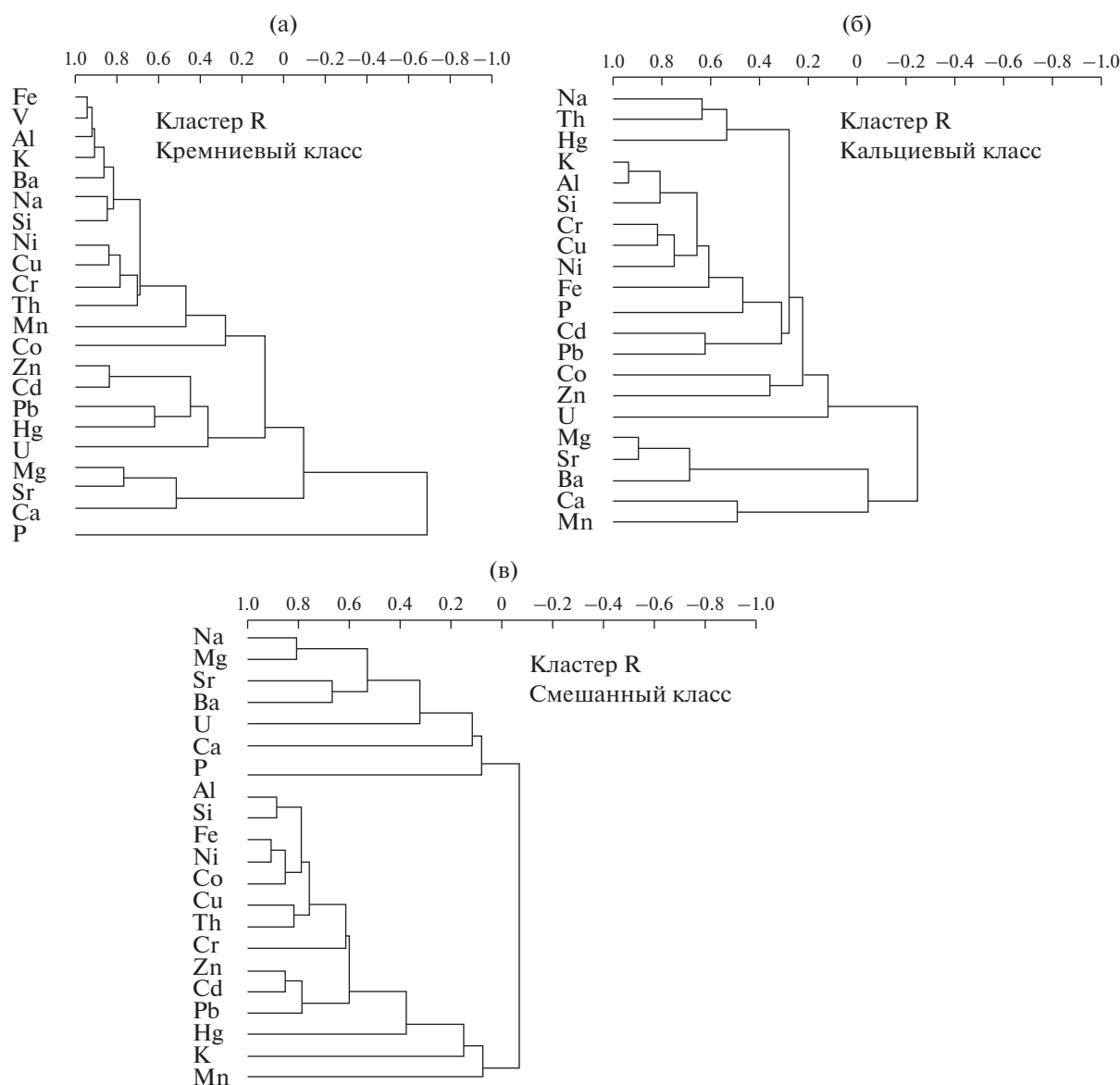
чиванием его из минералов и отмирающего органического вещества в толще осадка.

Проведенный кластерный анализ по содержаниям макроэлементов и радионуклидов в образцах почв и сапропелевых отложений показал, что наиболее сильные положительные корреляционные связи с Al имеют Si, Th, K, Na, тесно связанные со многими микроэлементами, которые представляют, главным образом, минералы обломочной части донных отложений — кварц, полевые шпаты, слюды, темноцветные силикаты и алюмосиликаты (рис. 4). У U(Ra) корреляционные связи с этими элементами (в том числе и с торием) отсутствуют. Так как воды исследуемых территорий в основном щелочные, то такие физико-химические свойства воды благоприятствуют высокой подвижности урана в виде уранил-карбонатных соединений Na (Евсеева, Перельман, 1962 и др.). В восстановительной обстановке в озерах с застойным гидродинамическим режимом происходит восстановление урана, ранее сорбированного коллоидными частицами (Титаева, 2005).

Определение содержаний урана, тория и калия в компонентах изученных малых озер позволяет сравнить вклады удельной активности естественных радионуклидов в разных ландшафтных зонах юга Западной Сибири, а также их суммарные удельные активности (рис. 5). Значения  $A_c$  почв

биоты варьируют в широких пределах, но даже в единичных случаях превышение 300 Бк/кг не выявлено. Полученные величины по почвам согласуются с литературными данными по естественной радиоактивности геологических пород (Титаева, 2000; Рихванов, 2009). В донных отложениях всех изученных малых озер суммарная эффективная удельная активность естественных радионуклидов ( $A_c$ ) ниже чем в почвах водосборных площадей и не превышает норму 300 Бк/кг, указанную в ГОСТе (ГОСТ Р 54519, 2011). Обращает внимание, что  $A_c$  сапропелевой залежи в основном слабо наследует радиогеохимические особенности водосбора, т.е. почвообразующих пород. Это связано со значительным вкладом в величину  $A_c$  биоты, который меняется в очень широком диапазоне в пределах одного озера (видовая зависимость) и между озерами, в пределах одной ландшафтной зоны, и между ландшафтными зонами. Это связано с большим вкладом калия в суммарную удельную активность, и присутствующего в значительных количествах в биомассе. Соотношение между весовыми содержаниями урана, тория и калия и их удельной активностью приведено в работе Л.П. Рихванова (Рихванов, 2009).

Чтобы дать полную оценку радиационного состояния изученных сапропелевых залежей для возможного их промышленного освоения, полу-



**Рис. 4.** Дендрограммы корреляционных связей химических элементов (кластер-анализа R-типа), где использованы аналитические данные по содержаниям макро- и микроэлементов (Si, Ca, Na, K, Al, Mg, Fe, Ti, P, Mn, Sr, Ba, Pb, Cd, V, Cu, Zn, Co, Ni, Cr, Hg, U, Th) в разных классах сапропелевых отложений (а) – кремниевый, (б) – кальциевый, (в) – смешанный.

ченные результаты систематизированы по соотношению зольности осадка и величины суммарной эффективной удельной активности ( $A_c$ ) естественных радионуклидов в разных водоемах озерных систем, локализованных в разных ландшафтах (рис. 6). Зависимости величины  $A_c$  от зольности осадка не выявлено, то есть еще раз подтверждается значительное влияние биогеохимических процессов, происходящих в толще воды на формирование химического состава сапропелевой залежи. Детальное исследование зависимости  $A_c$  от минерального состава образцов сапропелей различных классов показало следую-

щее. Как и следовало ожидать, минимальные величины  $A_c$  установлены для карбонатных сапропелей, так как кальцит и доломит практически не сорбируют и не содержат примеси микроэлементов, за некоторым исключением (Sr, Mn, Ba). Наличие слюд или калиевого полевого шпата в значительных количествах в сапропелевых отложениях наоборот приводит к увеличению величин  $A_c$ , из-за присутствия значительного количества калия в составе минералов терригенной фракции. Пониженные содержания тория, урана, калия в сапропелевых отложениях озер во всех ландшафтных зонах, а следовательно, и  $A_c$ , также свя-

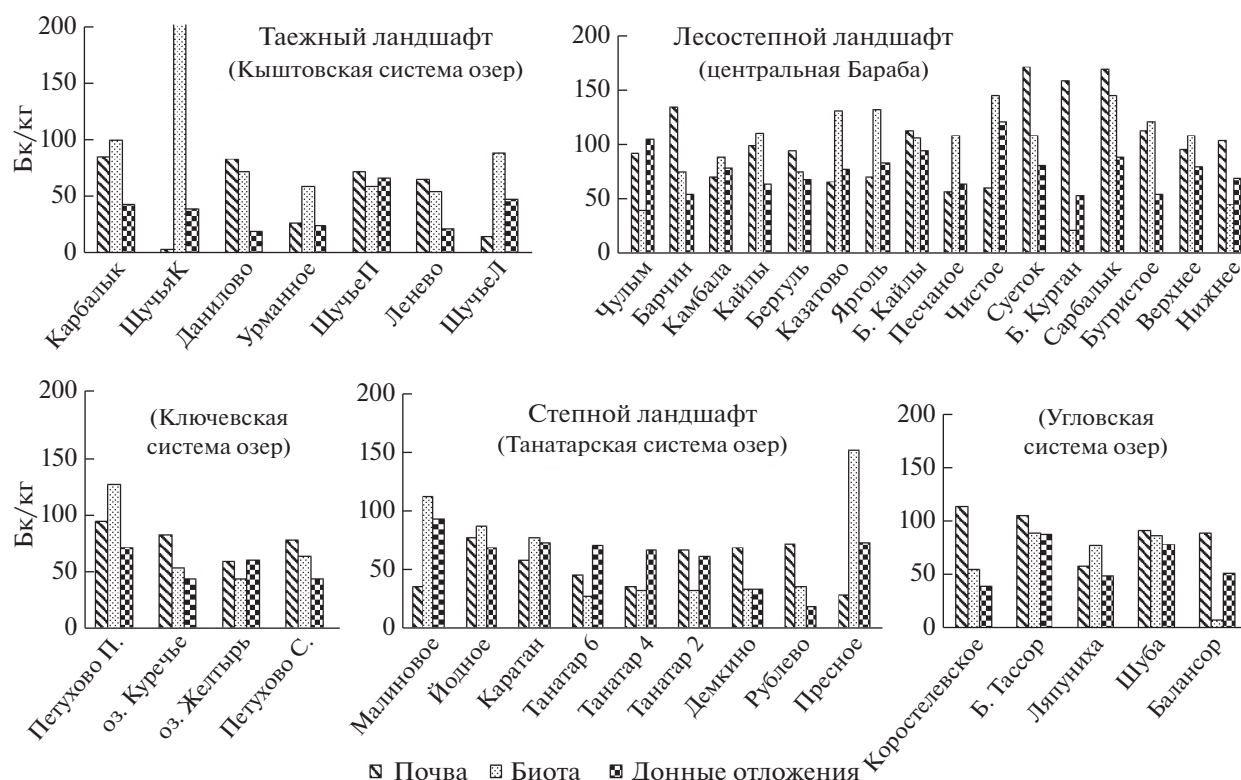


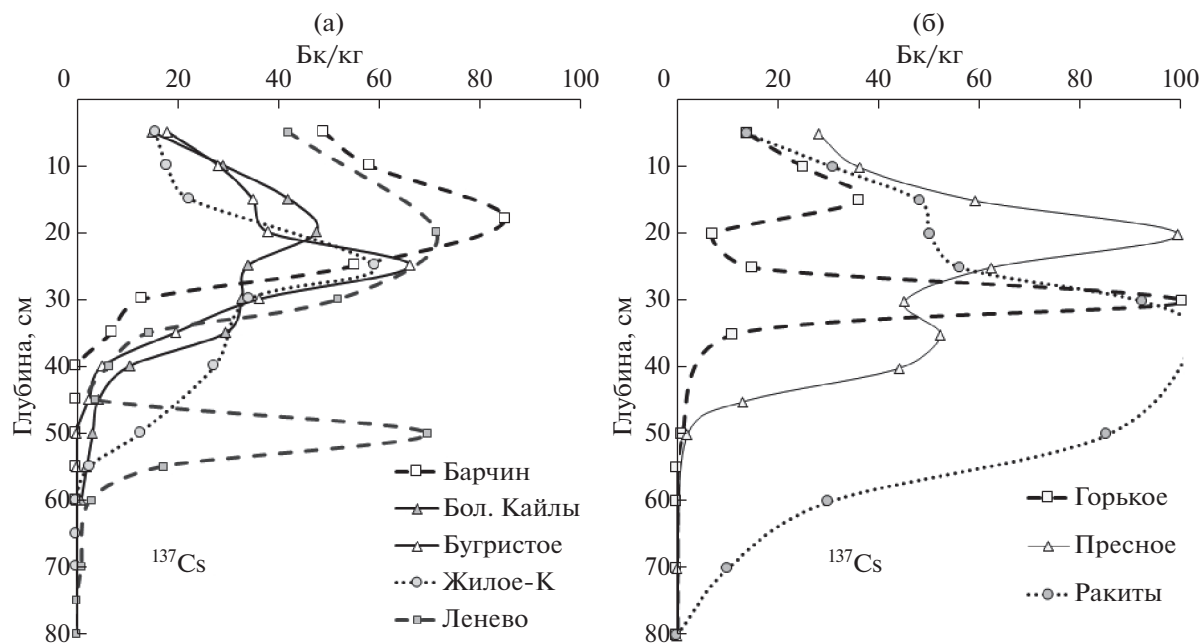
Рис. 5. Суммарная эффективная удельная активность естественных радионуклидов (Ас Бк/кг) в почвах, биоте и донных отложениях озер (на сухую массу), локализованных в различных ландшафтах Барабинской низменности и Кулундинской равнины. По оси X расположены названия озер.



Рис. 6. Суммарная эффективная удельная активность естественных радионуклидов (Ас) (Бк/кг) (на сухую массу) и зольность сапропелевой залежи в озерах Барабинской низменности и Кулундинской равнины. Среди озер овалом выделены озера с высоким содержанием Са в сапропелевой залежи.

зано с разубоживанием исследуемых осадков кремнеземом (кварцевым песком эолового генезиса). Следует обратить внимание, что наличие бордюрного типа зарастания исследованных водоемов макрофитами, часто препятствует по-

ступлению минералов эолового генезиса в сапропелевую залежь. Установленная ранее авторами идентичность микроэлементного состава озерных илов и почв степного ландшафта малых озер позволяет предполагать, что основными источ-



**Рис. 7.** Вертикальное распределение удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  (Бк/кг) в профилях сапропелевых отложений озер Барабинской низменности (а) и Кулундинской равнины (б) с разным химическим составом с неоднородным накоплением радиоцезия. Тип маркера обозначает класс сапропелевой залежи: квадрат — кальциевый ( $\text{Ca} > \text{Si}$ ); круг — кремниевый ( $\text{Si} > \text{Ca}$ ); треугольник — смешанный ( $\text{Si} \sim \text{Ca}$ ).

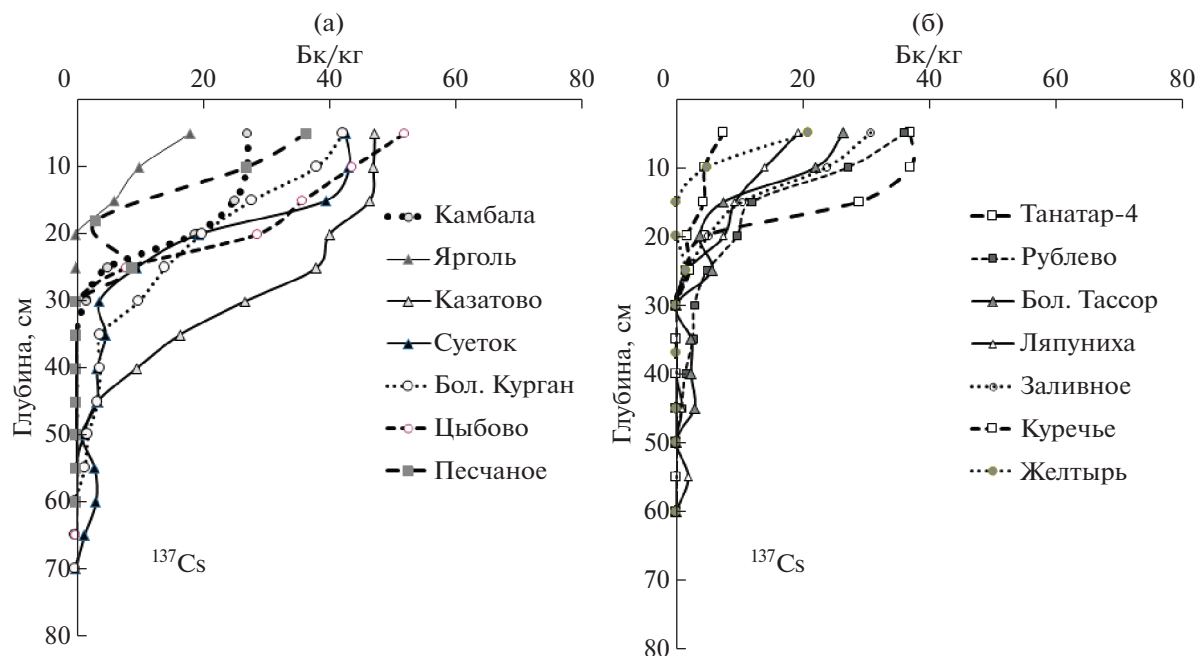
никами вещества озерных осадков являлись почвенные частицы, развитые на лессовидных суглинках, а основным транспортирующим агентом были временные потоки снеготалых и дождевых вод и ветровые эоловые поступления, часто связанные с пыльными бурями, широко развитыми на юге Западной Сибири и (Гавшин и др., 1999; Страховенко, 2011 и др.).

В озерах с открытыми берегами (например: Желтырь, Шуба, Жилое К), высокие значения  $A_{\text{с}}$  связаны именно с присутствием большого количества мусковита в осадке, хотя в суглинках на берегу озер мусковит выявлен в следовых количествах. Мусковит, как любой минерал слюд, имеет пластинчатые агрегаты, представленные тонкими листочками и пластинками, которые легко переносятся ветрами на значительные расстояния. Поэтому в озерах с открытыми берегами пластинки мусковита могут быть привнесены с территорий, не относящихся к водосбору.

Обращают внимание наличие высоких значений активности радиоцезия в почвах и сапропелевых отложениях, иногда значительно превышающие фоновые. Отдельные районы Барабы и Кулунды, как и вся территория Западной Сибири, подвергались радиоактивным выпадениям и до настоящего времени почвы и донные осадки загрязнены радиоцезием. На основе имеющейся базы данных по активности  $^{137}\text{Cs}$ , пересчитанных на 2010 г., с помощью программных пакетов

QGIS и ArcView были построены детализированные модели площадного распределения запасов  $^{137}\text{Cs}$  мКи/км<sup>2</sup> озерных систем разных районов Барабинской низменности и Кулундинской равнины и почв их водосборных площадей. Этот материал в основном соответствует ранее построенным картам, например, карте запасов радиоцезия в верхнем гумусово-аккумулятивном горизонте почв Новосибирской области и Алтайского края (Ад) (Маликова и др., 2005; Маликова, Страховенко, 2011 и др.).

По характеру вертикального распределения  $^{137}\text{Cs}$  в профиле сапропелевых залежей изученные озерные системы можно разделить на два основных типа. К первому типу распределения  $^{137}\text{Cs}$  в сапропелевых залежах могут быть отнесены озера, где отчетливо наблюдаются один или два пика активности  $^{137}\text{Cs}$  на разной глубине донной залежи, а вверх и вниз по разрезу происходит затухание удельной активности радиоизотопа (рис. 7). Аномальные содержания  $^{137}\text{Cs}$  в глубинных интервалах являются свидетельством первоначального загрязнения осадков от ядерных взрывов, начиная с 1949 г. Их можно связать со временем прохождения радиоактивных облаков и выпадением радиоактивных осадков на озерные системы. Такие озера пространственно тяготеют к площадным следам радиоактивных выпадений и, несомненно, относятся к озерным системам с первичным загрязнением акватории озера (Селе-



**Рис. 8.** Вертикальное распределение удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  (Бк/кг) в профилях сапропелевых отложений озер Барабинской низменности (а) и Кулундинской равнины (б) с разным химическим составом с постепенным накоплением радиоцезия к верхним интервалам, начиная с глубины 40–50 см. Тип маркера обозначает класс сапропелевой залежи: квадрат – кальциевый ( $\text{Ca} > \text{Si}$ ); круг – кремниевый ( $\text{Si} > \text{Ca}$ ); треугольник – смешанный ( $\text{Si} \sim \text{Ca}$ ).

гей, 1997; Рихванов, 2009). Сапропелевые залежи в таких озерах отличаются повышенной активностью радиоцезия, превышающей в 2 и более раз глобальный фон (34 мКи/км<sup>2</sup> на 2010 г.). Плотность глобальных выпадений  $^{137}\text{Cs}$  в средних широтах Сибири по разным оценкам (в том числе и авторов этой статьи) в пересчете на 2010 г. составляет от 34 до 53 мКи/км<sup>2</sup> (0.9–1.5 кБк/м<sup>2</sup>) (Черняга и др., 2012 и др.).

Особенность второго типа заключается в том, что радиоцезием обогащены верхние горизонты с постепенным убыванием его активности к нижним интервалам до глубин 40–50 см и выходом на “ноль” (рис. 8). Ниже уровня 40–50 см в иловых залежах  $^{137}\text{Cs}$  не обнаружен. В наших более ранних исследованиях показано, что глубины около 40–50 см, согласно графикам распределения  $^{210}\text{Pb}$ , соответствуют началу ядерных испытаний на Семипалатинском полигоне (Страховенко и др., 2010; Strakhovenko et al., 2017 и др.). Подобный характер распределения отмечается в значительной части изученных озер. Такое распределение вероятнее всего объясняется тем, что идет постоянное перераспределение радионуклидов на границе вода-дно, которое сопровождается поступлением  $^{137}\text{Cs}$  с площадей водосбора в озеро с почвенными частицами: основная масса  $^{137}\text{Cs}$  сконцентрирована в верхнем дерновом слое почв даже в современное время, и при его разрушении радионуклид выносится (табл. 2). Только на про-

тяжении последних 20 лет происходит выравнивание и даже уменьшение поступления  $^{137}\text{Cs}$  в донный осадок относительно предыдущих десятилетий. Уменьшение значений активности  $^{137}\text{Cs}$  самого верхнего горизонта связано с начавшимся падением содержаний радиоизотопа в дерновом горизонте почв вследствие его естественного распада. То есть, данный тип распределения связан со вторичным перераспределением запасов “задержанного” почвенного  $^{137}\text{Cs}$  между компонентами озерной системы и постепенной его аккумуляцией в осадке. Кроме того, на границе вода-дно идет постоянное перераспределение радиоцезия между осаждающимися на дно остатками отмирающей биомассы и новым накоплением радионуклидов укореняющимися водными растениями и бентосом. Если почвы постепенно освобождаются от техногенных радионуклидов в результате химических и физических воздействий, то озера служат их накопителем, то есть, на первичное радиоактивное загрязнение озера накладываются вторичные процессы.

Для большей части сапропелевых залежей изученных озер, независимо от их химического состава, уровни загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  соответствуют уровню глобального фона. Очевидно, именно неоднородность распределения радиоцезия в почвах и донных отложениях, связанная с неравномерностью выпадения атмосферных осадков в периоды ядерных испытаний, что является основной причи-

**Таблица 2.** Морфологическое строение и вертикальное распределение удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  (Бк/кг) в генетических горизонтах почв, обследованных на водосборной площади озер

| Горизонт                                   | Глубина залегания | $^{137}\text{Cs}$ , Бк/кг | Горизонт                                  | Глубина залегания | $^{137}\text{Cs}$ , Бк/кг |
|--------------------------------------------|-------------------|---------------------------|-------------------------------------------|-------------------|---------------------------|
| <b>Барабинская низменность озеро Жилое</b> |                   |                           | <b>Кулундинская равнина озеро Демкино</b> |                   |                           |
| Чернозем обыкновенный                      |                   |                           | Дерново-подзол иллювиально-железистый     |                   |                           |
| A                                          | 0–5 см            | 54                        | O                                         | 0–2 см            | 43                        |
| A                                          | 5–10 см           | 31                        | A <sub>1</sub>                            | 2–7 см            | 27                        |
| A                                          | 10–16             | 9                         | A <sub>1</sub>                            | 7–12 см           | 12                        |
| AB                                         | 16–31 см          | 0                         | A <sub>1</sub>                            | 12–17 см          | 2                         |
| B                                          | 31–54 см          | 0                         | A <sub>1</sub> A <sub>2</sub>             | 17–27 см          | 0                         |
| BC                                         | >54 см            | 0                         | A <sub>2</sub> B <sub>1</sub>             | 27–35 см          | 0                         |
| Лугово-черноземная солонцеватая почва      |                   |                           | B <sub>1</sub>                            | 35–75 см          | 0                         |
| A <sub>д</sub>                             | 0–6 см            | 36                        | B <sub>2</sub>                            | 75–104 см         | 0                         |
| A                                          | 6–18 см           | 12                        | B <sub>3</sub>                            | >104 см           | 0                         |
| B                                          | 18–40 см          | 0                         | Луговая солончаковатая                    |                   |                           |
| BC                                         | >40 см            | 0                         | S <sub>1</sub>                            | 0–5 см            | 54                        |
| Болотная перегнойно-глеевая почва          |                   |                           | S <sub>1</sub>                            | 5–8 см            | 32                        |
| A <sub>п</sub>                             | 0–5 см            | 89                        | A <sub>погр</sub>                         | 8–13              | 11                        |
| A <sub>п</sub>                             | 5–10 см           | 36                        | A <sub>погр</sub>                         | 13–18             | 0                         |
| A <sub>п</sub>                             | 10–15 см          | 12                        | A <sub>погр</sub>                         | 18–20 см          | 0                         |
| A <sub>п</sub>                             | 15–20 см          | 0                         | AS <sub>2</sub>                           | 20–35 см          | 0                         |
| C                                          | 20–24 см          | 0                         | S <sub>2</sub>                            | 35–50 см          | 0                         |
| C                                          | >24 см            | 0                         | S <sub>3</sub>                            | >50 см            | 0                         |
| <b>Озеро Цыбово</b>                        |                   |                           | <b>Озеро Малиновое</b>                    |                   |                           |
| Луговая дерновая почва                     |                   |                           | Солончак соровый                          |                   |                           |
| A <sub>д</sub>                             | 0–5 см            | 49                        | S <sub>1</sub>                            | 0–5               | 24                        |
| A                                          | 5–10 см           | 15                        | S <sub>2</sub>                            | 5–10 см           | 13                        |
| A                                          | 10–15 см          | 4                         | S <sub>2</sub>                            | 10–15 см          | 4                         |
| A                                          | 15–22 см          | 0                         | S <sub>2</sub>                            | 15–20 см          | 0                         |
| AC                                         | 22–37 см          | 0                         | S <sub>3</sub>                            | 20–36             | 0                         |
| C                                          | >37 см            | 0                         | S <sub>4</sub>                            | 36–47             | 0                         |
| <b>Озеро Мостовое</b>                      |                   |                           | S <sub>4</sub> S <sub>5</sub>             | 47–59             | 0                         |
| Серая лесная типичная почва                |                   |                           | S <sub>5</sub>                            | >59 см            | 0                         |
| A                                          | 0–5 см            | 22                        | <b>Озеро Йодное</b>                       |                   |                           |
| A                                          | 5–10 см           | 11                        | Дерново-подзол иллювиально-железистый     |                   |                           |
| A                                          | 10–15 см          | 2                         | A <sub>1</sub>                            | 0–5               | 17                        |
| A                                          | 15–22 см          | 0                         | A <sub>1</sub>                            | 5–10              | 7                         |
| AB                                         | 22–44 см          | 0                         | A <sub>1</sub>                            | 10–15             | 2                         |
| B                                          | 44–74 см          | 0                         | A <sub>1</sub>                            | 15–21             | 0                         |
| BC                                         | >74 см            | 0                         | A <sub>1</sub> A <sub>2</sub>             | 21–60             | 0                         |
| <b>Озеро Большие Кайлы</b>                 |                   |                           | A <sub>2</sub> B <sub>1</sub>             | 60–82             | 0                         |
| Серая лесная типичная почва                |                   |                           | B <sub>1</sub>                            | (>82 см           | 0                         |
| A                                          | 0–5 см            | 38                        | <b>Озеро Красновишневое</b>               |                   |                           |
|                                            | 5–10              | 21                        | Лугово-степная солонцеватая почва         |                   |                           |
| AB                                         | 10–15             | 3                         | A/                                        | 0–5 см            | 21                        |
| AB                                         | 15–20 см          | 0                         | A/                                        | 5–10 см           | 4                         |
| AB                                         | 20–31             | 0                         | A/                                        | 10–15 см          | 0                         |
| B                                          | >31 см            | 0                         | A/                                        | 15–20 см          | 0                         |
| Луговая дерновая почва                     |                   |                           | A//                                       | 20–25             | 0                         |
| A <sub>д</sub>                             | 0–17 см           | 31                        | AB                                        | 25–30             | 0                         |
| A                                          | 17–40 см          | 0                         | B <sub>1</sub>                            | 30–35             | 0                         |
| C                                          | >40 см            | 0                         | B <sub>1</sub>                            | 35–40             | 0                         |
| <b>Озеро Песчаное</b>                      |                   |                           | AB <sub>г</sub>                           | 40–58             | 0                         |
| Луговая дерновая почва                     |                   |                           | BC                                        | 58–76             | 0                         |
| A <sub>д</sub>                             | 0–5 см            | 42                        | C                                         | >76 см            | 0                         |
| A <sub>д</sub>                             | 0–10 см           | 23                        | Солончак соровый                          |                   |                           |
| A                                          | 10–15 см          | 11                        | S <sub>1</sub>                            | 0–5 см            | 24                        |
| A                                          | 15–20 см          | 3                         | S <sub>1</sub>                            | 5–10 см           | 15                        |
| AB                                         | 20–30 см          | 0                         | S <sub>1</sub>                            | 10–15 см          | 4                         |
| AB                                         | 30–59 см          | 0                         | S <sub>2</sub>                            | 15–20 см          | 0                         |
| C                                          | 59–78 см          | 0                         | S <sub>3</sub>                            | 21–26             | 0                         |
| C                                          | >78 см            | 0                         | S <sub>4</sub>                            | 26–50             | 0                         |

ной того, что не отмечается зависимости активности  $^{137}\text{Cs}$  в сапропелевых залежах озер от локализации их в разных ландшафтных зонах. Влияние локальных ландшафтных обстановок сказывается на протекании эрозионно-аккумулятивных процессов и литохимической миграции. Известны факты, показывающие, что из верхних горизонтов почвенных разрезов наблюдается миграция радиоцезия на глубину, но это не обнаруживается в изученных нами почвенных профилях (табл. 2) (Израэль, 2005; Рихванов, 2009 и др.).

Распределение естественных радионуклидов в сапропелевых залежах по всей глубине керна практически однородно на протяжении исследуемого временного интервала, и в отличие от почвенных профилей зависят, главным образом, не только от состава почвообразующих пород (Malikova, Strakhovenko, 2017; Strakhovenko et al., 2017), но и состава биомассы органической части осадка.

В отдельных озерах установлена роль тростниковых бордюров как геохимического барьера, за который, по-видимому, не переносятся почвенные частицы, сносимые с берегов (Ovdina et al., 2019). На тростниковых бордюрах происходит частичная сорбция растворенных форм урана, калия и радиоцезия и накопление их в корневых члестях кочек (корневой системы рогаза и тростника).

Согласно полученным данным не обнаружены существенные различия как по типам сапропеля, так и по классам в накоплении и распределении в их кернах радиоцезия.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В донных отложениях изученных малых озер суммарная эффективная удельная активность (Ас) не превышает санитарную норму 300 Бк/кг, указанную в ГОСТе (ГОСТ, 2011). Основными факторами, определяющими величину Ас сапропелевой залежи отдельно взятого озера, являются: минеральный состав осадка, зависящий от биохимических процессов, происходящих в толще воды и в верхнем слое донного осадка; радио-геохимические особенности почв водосбора, а, следовательно, и вмещающих пород областей формирования озер; наличие бордюрного типа зарастания исследованных водоемов макрофитами, препятствующего поступлению эоловой составляющей терригенной фракции пылевых бурь.

В некоторых изученных озерах установлены горизонты в разрезах сапропелевых залежей с превышением глобального фона (32 мКи/км<sup>2</sup> на 2010 г.) запасов  $^{137}\text{Cs}$  в 2 раза и выше. Данные озера пространственно тяготеют к площадным следам радиоактивных выпадений от ядерных испытаний на Семипалатинском полигоне и, несомненно, относятся к озерным системам с первичным

загрязнением акватории озера и почв водосбора. Если почвы постепенно освобождаются от техногенных радионуклидов в результате радиоактивного распада, то озера служат их накопителем, поскольку на первичное радиоактивное загрязнение в них накладываются вторичные процессы сноса с водосбора. Аномальные (пиковые) содержания  $^{137}\text{Cs}$  на определенных глубинных интервалах являются свидетельством первоначального загрязнения осадков от ядерных взрывов, начиная с 1949 г.

Согласно ст. 19 Федерального закона “Об охране окружающей среды” от 10.01.2002 № 7-ФЗ, которая нормирует не только качество окружающей среды, но и определяет нормативы допустимого воздействия на окружающую среду при ведении хозяйственной и иной деятельности, гарантирующие обеспечение экологической безопасности, отдельные горизонты в разрезах части изученных сапропелевых залежей не могут использоваться напрямую из-за загрязнения их техногенным радиоцезием. Нужно решить вопрос разубоживания данных горизонтов сапропелевых отложений материалом с невысокой активностью радиоцезия (песок, супесь и т.д.) или полную утилизацию этих слоев сапропеля с высокой активностью радиоцезия, который обычно не превышает по мощности 10 см и составляет не более 1% от мощности всей залежи.

В случае изъятия сапропелей со дна озера действительно решаются экологические проблемы озера: устраняется заиливание водоема, что резко снижает внутреннюю эвтрофирующую нагрузку и обеспечивает устойчивое функционирование естественной экологической системы, предотвращает деградацию озера. Научно обоснованное извлечение сапропелевых отложений со дна озер необходимо для рационального использования природных ресурсов и будет способствовать поддержанию природного баланса озерных систем.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИГМ СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексахин Р.М. (1982) Ядерная энергия и биосфера. М.: Энергоиздат, 216.
- Баранов В.И. (1956) *Радиометрия*. М.: Изд-во АН СССР, 343 с.
- Болтнева Л.И., Израэль Ю.А., Ионов В.А., Назаров И.М. (1977) Глобальное загрязнение  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  и дозы внешнего облучения на территории СССР. *Атомная энергия*. 42(5), 355–360.
- Бочаров М.В., Лоборов В.М., Матвейчук И.П., Судачков В.В. (1993) Глобальное радиоактивное загрязнение природной среды Северного полушария и вклад в него

- советских ядерных испытаний. *Атомная энергия*. **78**(1), 50–53.
- Гавшин В.М., Сухоруков Ф.В., Маликова И.Н. (1993) Распределение радионуклидов на территории Алтайского края. *Ядерные испытания, окружающая среда и здоровье населения Алтайского края. Материалы научных исследований*. Барнаул. **1**(1), 34–72.
- Гавшин В.М., Сухоруков Ф.В., Пархоменко В.С., Маликова И.Н., Мельгунов М.С. (2000) Следы Чернобыльской аварии в Западной Сибири. “Радиоактивность при ядерных взрывах и авариях”. Труды международной конференции, Москва 24–26 апреля 2000, т. 1. Санкт-Петербург, Гидрометеоиздат, 178–182.
- Гавшин В.М., Шербов Б.Л., Страховенко В.Д., Мельгунов М.С., Бобров В.А., Цибульчик В.М. (1999)  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{210}\text{Pb}$  в озерных отложениях степного Алтая как показатели динамики антропогенных изменений геохимического фона на протяжении XX в. *Геология и геофизика*. **40**(9), 1331–1341.
- ГОСТ 31861 (2012) Вода. Общие требования к отбору проб. Межгосударственный стандарт.
- ГОСТ Р 54519. (2011) Удобрения органические. Методы отбора проб. Национальный стандарт РФ.
- Евсеева Л.С., Перельман А.И. (1962) *Геохимия урана в зоне гипергенеза*. М.: Госатомиздат, 239 с.
- Ермолаева Н.И., Зарубина Е.Ю., Страховенко В.Д., Романов Р.Е., Пузанов А.В., Овдина Е.А. (2017) Оценка влияния абиотических факторов на продукцию экосистем малых озер юга Западной Сибири. Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах: труды VI Всероссийского симпозиума с международным участием. Барнаул, 78–83.
- Ермолаева Н.И., Зарубина Е.Ю., Кириллов В.В., Безматерных Д.М., Митрофанова Е.Ю., Вдовина О.Н., Винокурова Г.В., Долматова Л.А., Соколова М.И. (2019) Факторные характеристик гидробиоценозов озер сухо-степной подзоны Обь-Иртышского междуречья. Чтения памяти В.Я. Леванидова. № 8, 46–55.
- Израэль Ю.А., Квасникова Е.В., Назаров И.М., Ступкин Е.Д. (2000) Радиоактивное загрязнение цезием-137 территории России на рубеже веков. *Метеорология и гидрология*. **4**, 20–31.
- Израэль Ю.А. (2005) Антропогенное радиоактивное загрязнение планеты Земля Радиоактивность после ядерных взрывов и аварий: Материалы международной конференции. М.: Изд-во Гидромет, 13–24.
- Ильин В.Б., Сысо А.И. *Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области*, Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 229 с.
- Зарубина Е.Ю., Соколова М.И. (2019) Роль зональных факторов в формировании продуктивности малых озер юга Обь-Иртышского междуречья. Озера Евразии: проблемы и пути их решения. Матер. межд. конф. Казань: Изд-во АН РТ, Ч. 1, 80–84.
- Зарубина Е.Ю., Феттер Г.В. (2019) Процессы продукции и деструкции органического вещества в горных озерах Русского Алтая. XII Съезд Гидробиологического общества при РАН: тезисы докладов, г. Петрозаводск, 16 сентября–20 сентября 2019 г. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 165–166.
- Зарубина Е.Ю. (2013) Первичная продукция макрофитов трех разнотипных сапропелевых озер юга Западной Сибири (в пределах Новосибирской области) в 2012 г. Е.Ю. Зарубина. Мир науки, культуры, и образования. **5**(42), 441–444.
- Зарубина Е.Ю., Ермолаева Н.И., Страховенко В.Д., Овдина Е.А., Романов Р.Е., Таран О.П. (2018) Связь химического состава сапропелей с продуктивностью планктона и макрофитов в озерах юга Западной Сибири. Водные ресурсы России: современное состояние и управление: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, г. Сочи, 08–14 октября 2018 г. — В 2-Х-ТОМаХ. Том 1. Новочеркасск: Лик, 333–339.
- Классификация почв России (1997). Составители: Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева РАСХН, 235 с.
- Кордэ Н.В. (1969) *Биостратиграфия и типология русских сапропелей*. М.: Изд-во АН СССР, 219 с.
- Курзо Б.В., Гайдукевич О.М., Кузьмицкий М.В. (2010) Совершенствование методологии разведки сапропелевых месторождений, технологий добычи и переработки сапропелевого сырья для повышения эффективности его использования. *Новости науки и технологий*. **16**(3), 16–26.
- Лисицын А.П. (2014) Мировой океан. Т. II. Физика, химия и биология океана. Осадкообразование в океане и взаимодействие геосфер Земли. Под ред. Л.И. Лобковского, Р.И. Нигматулина. М.: Науч. мир, 331–571.
- Лопотко М.З. (1978) *Озера и сапропель*. Минск, 88 с.
- Лопотко М.З., Евдокимова Г.А., Букач О.М. (1986) Методические указания по поискам и разведке озерных месторождений сапропелей БССР. Минск: Наука и техника, 115 с.
- Маликова И.Н., Страховенко В.Д., Сухоруков Ф.В., Девятова А.Ю. (2005) Экологическое состояние почв Алтайского края: загрязнение радиоцезием. *Сибирский Экологический журн.* **12**(6), 985–998.
- Маликова И.Н., Страховенко В.Д. (2011) Уран, торий и Th/U отношение в почвах юга Западной Сибири. *Проблемы биогеохимии и геохимической экологии*. **15**(1), 26–39.
- Медведев В.И., Коршунов Л.Г., Черняго Б.П. (2005) 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 журн.* **6**(12), 1055–1071.
- Мельгунов М.С., Гавшин В.М., Сухоруков Ф.В., Калугин И.А., Бобров В.А., Klerkx J. (2011) Аномалии радиоактивности на южном побережье озера Иссык-Куль (Кыргызстан). *Химия в интересах устойчивого развития*. (6), 869–880.
- Михайловская Л.Н., Молчанова И.В., Нифонтова М.Г. (2015) Радионуклиды глобальных выпадений в растениях наземных экосистем Уральского региона. *Экология*. **1**, 9–15.
- Михальчук А.А., Язиков Е.Г., Ершов В.В. (2006) Статистический анализ эколого-геохимической информации: учебное пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 235с.
- Моисеев А.А. Цезий-137 в биосфере (1975) А.А. Моисеев, П.В. Рамзаев. М.: Атомиздат, 182 с.

- Наливкин Д.В. (1969) Ураганы, бури и смерчи. Географические особенности и геологическая деятельность. Ленинград: Наука, Ленинградское отд., 479 с.
- Никольская Ю.П. (1961) *Процессы солеобразования в озерах и водах Кулундинской степи*. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 481 с.
- Объяснительная записка к карте четвертичных отложений. (1967) Масштаб 1 : 200 000. Серия Кулундинско-Барабинская. Лист: N-44-I.
- Овдина Е.А., Страховенко В.Д., Ермолаева Н.И., Зарубина Е.Ю., Салтыков А.В. (2016) Современное минералообразование в озерах Петухово Кулундинской степи. Водные ресурсы: изучение и управление (лимнологическая школа-практика). Материалы V Международной конференции молодых ученых (5–8 сентября 2016г). Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 210–217.
- Овдина Е.А., Страховенко В.Д., Ермолаева Н.И., Зарубина Е.Ю., Сысо А.И., Ермолов Ю.В. (2016) Особенности распределения радионуклидов в оз. Сарбалык (Барабинская равнина). В сборнике: Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека Материалы V Международной конференции, 475–477.
- Павлоцкая Ф.И. (1974) *Миграция радиоактивных продуктов глобальных выпадений в почвах* Ф.И. Павлоцкая. М., Атомиздат, 216 с.
- Почвы Новосибирской области*. (1966) Новосибирск: Наука, Сиб. Отделение, 422 с.
- Пузанов А.В., Рождественская Т.А., Бабошкина С.В., Ельчиногова О.А., Балыкин Д.Н., Балыкин С.Н., Салтыков А.В., Горбачев И.В., Трошкова И.А. (2016) СОДЕРЖАНИЕ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ ЕСТЕСТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ (238U, 232Th, 40K) В ПОЧВАХ БАССЕЙНА Р. ВЕРХНИЙ АЛЕЙ (ЮГО-ЗАПАД АЛТАЙСКОГО КРАЯ) В сборнике: "Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека" Материалы V Международной конференции, 534–537.
- Пузанов А.В., Балыкин С.Н., Салтыков А.В., Трошкова И.А. (2017) Почвы водосборной площади малых сапропелевых озер Минзелинское, Иткуль, Канкуль, Качкульня (Новосибирская область). *Известия Алтайского отделения Русского географического общества*. 1(44), 80–84.
- Рихванов Л.П. (2009) Радиоактивные элементы в окружающей среде и проблемы радиоэкологии: учебное пособие. Томск: STT, 430 с.
- Робертус Ю.В., Фатин В.И., Рылов О.Б., Шамов С.Л. (1993) Аномальные повышения радиоактивного фона на территории Алтайского края. *Ядерные испытания, окружающая среда и здоровье населения Алтайского края. Материалы научных исследований*. 1(1), 112–116.
- Селегей В.В. (1997) Радиоактивное загрязнение г. Новосибирска- прошлое и настоящее. Новосибирский филиал сети фондов Сороса: Новосибирск, 145 с.
- Серебренникова О.В., Стрельникова Е.Б., Кадычачов П.Б., Русских И.В., Ельчиногова Е.Д. (2017) Вертикальное распределение органических соединений в донных отложениях двух степных озер на юге Сибири. *Водные ресурсы*, 44(5), 590–600.
- Страхов Н.М., Бродская Н.Г., Князева Л.М., Разживина А.Н., Ратеев М.А., Сапожников Д.Г., Шитова Е.С. *Образование осадков в современных водоемах*. Изд-во АН СССР. 1954. 276 с.
- Страхов Н.М. *Избранные труды. Осадкообразование в современных водоемах*. М.: Наука, 1993. 396 с.
- Страховенко В.Д., Щербов Б.Л., Маликова И.Н., Восель Ю.С. (2010) Закономерности распределения радионуклидов и редкоземельных элементов в донных отложениях озер различных регионов Сибири. *Геология и геофизика*. 51(11), 1501–1514
- Страховенко В.Д. (2011) Геохимия донных отложений малых континентальных озер Сибири Автор. Дис. на д. г.-м. н. Новосибирск, 36.
- Страховенко В.Д., Росляков Н.А., Сысо А.И., Ермолаева Н.И., Зарубина Е.Ю., Таран О.П., Пузанов А.В. (2016) Геохимическая характеристика сапропелей Новосибирской области *Водные ресурсы*. 43(3), 336–344.
- Страховенко В.Д., Овдина Е.А., Ермолаева Н.И., Зарубина Е.Ю., Таран О.П., Болтенков В.В., Мищенко Т.И. (2018) *Генезис сапропелевых отложений озер центральной части Барабинской равнины Осадочная геология Урала и прилегающих регионов: сегодня и завтра. Материалы 12 Уральского литологического совещания*. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, С. 334–337
- Страховенко В.Д., Таран О.П., Ермолаева Н.И. (2014) Геохимическая характеристика сапропелевых отложений малых озер Обь-Иртышского междуречья. *Геология и геофизика*. 55(10), 1466–147.
- Страховенко В.Д., Малов Г.И., Овдина Е.А., Ермолаева Н.И., Зарубина Е.Ю. (2019) Актуальные проблемы сохранения и использования сапропелевых залежей малых озер Барабинской низменности и Кулундинской равнины. *Озера Евразии: проблемы и пути их решения. Материалы II Международной конференции (19–24 мая 2019 г.)*. Казань: Издательство Академии наук РТ, (2), 184–189.
- Страховенко В.Д. (2011) Геохимия донных отложений малых континентальных озер Сибири: Автореферат на соискание ученой степени д. г.-м. н. Новосибирск, ИГМ СОРАН, 36 с.
- Сухоруков Ф.В., Маликова И.Н., Мальгин М.А., Гавшин В.М., Щербов Б.Л., Пузанов А.В., Страховенко В.Д., Ковалев С.И. (2001) Радиоцезий в почвах Сибири (опыт многолетних исследований) *Сибирский экологический журн.* (2), 131–142.
- Сысо А.И. (2007) *Закономерности распределения химических элементов в почвообразующих породах и почвах Западной Сибири Рос. Акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т почвоведения и агрохимии*. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 277 с.
- Таран О.П., Болтенков В.В., Ермолаева Н.И., Зарубина Е.Ю., Делий И.В., Романов Р.Е., Страховенко В.Д. (2018) Взаимосвязь химического состава органического вещества озерных систем и генезиса сапропелей. *Геохимия*. (3), 261–270.
- Taran O.P., Boltanov V.V., Ermolaeva N.I., Zarubina E.Yu., Delii I.V., Romanov R.E., Strakhovenko V.D. (2018) Relations between the Chemical Composition of Organic Matter in Lacustrine Ecosystems and the Genesis of Their Sapropel. *Geochem. Int.* 56(3), 256–265.
- Титаева Н.А. (2005) Геохимия природных радиоактивных рядов распада. М.: ГЕОС, 226

- Титаева Н.А. (2000) *Ядерная геохимия*. М.: Изд. МГУ, 226 с.
- Черняго Б.П., Бычинский В.Г., Калиновский Г.И. (2004) “Глобальный” цезий-137: от Байкала до Северного Ледовитого океана. Материалы II международной конференции “Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека”. Томск: ИД “Тандем-Арт”, 647-648.
- Черняго Б.П., Непомнящих А.И., Медведев В.И. (2012) Современная радиационная обстановка в центральной экологической зоне Байкальской природной территории. *Геология и геофизика*. **53**(9), 1206-1218.
- Штин С.М. (2005) Озерные сапропели и основы их комплексного освоения. М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 373 с.
- Gavshin V.M., Sukhorukov F.V., Bobrov V.A., Melgunov M.S., Miroshnichenko L.V., Klerkx J., Kovalev S.I., Romashkin P.A. (2004) Chemical composition of the uranium tail storages at Kadji-Sai (southern shore of Issyk-Kul Lake, Kyrgyzstan) *Water Air Soil Pollut.* (154), 71-83.
- Kemp A.E.S., Pearce R.B., Koizumi I., Pike J., Rance S.J. (1999) The role of mat-forming diatoms in the formation of Mediterranean sapropels. *Nature*. **398**(6722), 57-61.
- Malikova I.N., Strakhovenko V.D. (2017) The effect of landscape factors on natural radioactivity of soils in Siberia. *International Journal of Environmental Research*. **11**(5-6), 653-665
- Newsome L., Morris K., Lloyd J.R. (2014) The biogeochemistry and bioremediation of uranium and other priority radionuclides. *Chem. Geol.* (363), 164-184.
- Ovdina E.A., Strakhovenko V.D., Yermolaeva N.I., Zarubina E.Yu., Yermolov Yu.V. (2019) Radionuclide distribution in components of the Sarbalyk limnetic system (Baraba lowland, Western Siberia). *RUSSIAN JOURNAL OF EARTH SCIENCES*, VOL. 19. Iss. 6. Art.ES6013. ISSN 1681-1208 [Электронный ресурс]. <https://doi.org/10.2205/2019ES000681>
- Stein R. (2008) *Arctic Ocean Sediments. Processes, Proxies, and Paleoenvironment*. Amsterdam: Elsevier, 592 p.
- Strakhovenko V.D., Malikova I.N., Ovdina E.A., Denisenko A.A. (2017) Distribution of natural radionuclides in the bottom sediments of lakes in different landscape areas of Western Siberia *International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, STEF92 Technology Ltd.* **17**(11), 703-710.
- Wan D., Jin Zh., Wang Y. (2008) Geochemistry of eolian dust and its elemental contribution to Lake Qinghai sediments. *Appl. Geochem.* **27**(8), 1546-1555.