

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕР СИБИРИ

В.Д. Страховенко, Б.Л. Щербов, И.Н. Маликова, Ю.С. Восель

*Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Котляго, 3, Россия*

На основе геохимических исследований экосистем 184 озер Сибири, расположенных в трех крупнейших зонах Северной Азии: гумидной, аридной, семиаридной и горной определены содержания естественных радионуклидов, радиоцезия и редкоземельных элементов в сопряженных компонентах систем и характер основных источников вещества донных осадков.

Для датирования донных отложений использовались данные по активности радионуклидов ^{137}Cs и ^{210}Pb , что позволило рассчитать скорости осадконакопления в озерах различных регионов Сибири: на юге — 0.35, на севере — 0.25—0.3 см/год.

Для состава вод изученных озер ведущее значение имеют шесть основных ионов — (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-).

Распределение концентраций естественных радионуклидов в стратифицированных разрезах донных отложений озер Сибири свидетельствует о стабильности процессов осадкообразования и отражает их содержания в почвах водосборных площадей и могут рассматриваться как фоновые для этих территорий. Отмечаются более высокие концентрации урана и низкие тория и калия в осадках с повышенным содержанием органического вещества. Величина Th/K отношения в донных отложениях изученных озер соответствует почвенным. Значения Th/U несколько ниже, чем в почвах водосборных площадей, за счет аккумуляции урана хемогенной и органической составляющими.

Суммарный уровень загрязнения ^{137}Cs донных отложений озер Сибири соответствует глобальному фону (40 мКи/км² на 2000 г.), но в Алтайском крае, Республиках Бурятия и Алтай он превышен в 2 раза. Неравномерность распределения остаточных запасов радиоцезия как по площади, так и во временном интервале, отмечается не только в осадках различных озер, но и в пределах акватории отдельно взятого водоема.

Характер распределения редкоземельных элементов в донных отложениях разных минеральных типов соответствует трендам для континентальной коры и глин Русской платформы, хотя в органогенных и карбонатных осадках абсолютные их значения существенно ниже, чем в терригенных. Основным концентратором РЗЭ в донных отложениях озер является пелитовая фракция.

Континентальные озера Сибири, геохимия, естественные радионуклиды, радиоцезий, редкоземельные элементы, донные отложения, минерализация озерных вод.

THE REGULARITIES OF DISTRIBUTION OF RADIONUCLIDES AND RARE-EARTH ELEMENTS IN BOTTOM SEDIMENTS OF SIBERIAN LAKES

V.D. Strakhovenko, B.L. Shcherbov, I.N. Malikova, and Yu.S. Vosel'

Geochemical studies of the ecosystems of 184 Siberian lakes in three largest zones of northern Asia (humid, arid, and semiarid) and in mountainous area were carried out. The contents of natural radionuclides, radiocesium, and rare-earth elements in conjugate components of the systems and the types of the main sources of the bottom sediment material have been determined.

Dating of the bottom sediments was made by the activity of radioisotopes ^{137}Cs and ^{210}Pb , which permitted estimation of the sedimentation rates in lakes in different regions of Siberia: 0.35 cm/year in the south and 0.25–0.3 cm/year in the north.

Six main ions have been determined in the waters of the studied lakes: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , and Cl^- .

The distribution of natural radionuclides in the stratified sections of bottom sediments of Siberian lakes evidences the stable sedimentation and characterizes their contents in the soils of water-catchment areas, which can be considered background contents there. Sediments enriched in organic matter have higher concentrations of U and lower ones of Th and K. The Th/K ratio in the studied bottom sediments is the same as in the soils. The Th/U ratios are somewhat lower than those in the soils because U is accumulated by chemogenic and organic components.

The overall ^{137}Cs pollution of bottom sediments of Siberian lakes is close to the global background (40 mCi /km² in 2000), but in the Altai Territory and Buryatia and Altai Republics it is twice higher. The uneven areal and temporal distribution of residual radiocesium is observed not only in the lacustrine sediments but also in the lake water areas.

The REE patterns of bottom sediments of different mineral types are similar to those of continental crust and clays of the Russian Platform, though organogenic and carbonate sediments have higher absolute REE contents than terrigenous ones. Pelitic fraction is the main REE concentrator in the bottom sediments.

Continental lakes of Siberia, geochemistry, natural radionuclides, radiocesium, rare-earth elements, bottom sediments, mineralization of lake waters

ВВЕДЕНИЕ

Поведение естественных радионуклидов и редкоземельных элементов в эндогенных и гипергенных процессах, распределение их в осадочных толщах и в биосфере освещено в многочисленных статьях и монографиях [Рихванов, 1996; Титаева, 2000; Дубинин, 2006; Шевченко, 2006]. Меньше внимания уделено их поведению в цикле современного осадконакопления. Исследования по радионуклидам в континентальном осадконакоплении проводились в последние годы только в крупных уникальных озерных экосистемах, к числу которых относятся озера Байкал и Телецкое [Щербов и др., 1997; Бобров, 1999; Гавшин и др., 1999], а также оз. Иссык-Куль (Киргизия) [Мельгунов и др., 2003; Gavshin et al., 2004].

В Сибири озера представляют неотъемлемую часть практически всех ландшафтных зон. В бессточных или слабопроточных депрессиях, где обычно располагаются озера, происходит первичная и вторичная аккумуляция химических элементов, отражающая геохимические процессы, происходящие в озерах и на их водосборных площадях. При переносе в озера минеральной компоненты с площадей водосбора происходит, с одной стороны, смешение автохтонных и аллохтонных источников (усреднение химического состава), а с другой — дифференциация элементов, обусловленная присутствием их в разных формах в поверхностных водах [Балашов, 1976; Титаева, 2000; и др.]. Таким образом, геохимия элементов в современном процессе осадконакопления определяется совокупностью условий формирования осадков и химических свойств элементов. При формировании современного осадка континентальных озер Сибири активно проявляют себя следующие факторы: механическое разрушение, химическое разложение, биологические процессы. Поскольку изучаемые озерные экосистемы расположены в разных ландшафтно-климатических зонах, то и поступление в осадок обломочной, хемогенной и органической фракций различно. В условиях равнинного рельефа в обстановке умеренного климата интенсивно протекают процессы как механического, так и химического выветривания пород при активной жизнедеятельности организмов. Следовательно, в озерные отложения поступает обломочный и органический материал, растворенная и коллоидная формы. В горных областях механический снос начинает резко преобладать над химическим (растворенным) переносом вещества.

В существующих классификациях озер отмечается, что ведущее значение для состава поверхностных вод имеют шесть ионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-), а также водородный и гидроксильный ионы [Поползин, 1967; Дракцова, 1979; Перельман, 1982; Общие закономерности..., 1986; Добровольский, 2002]. В зависимости от pH, Eh, солёности вод и биохимической активности организмов привнесенная взвесь может оставаться в воде или перейти в осадок. Для малых озер существенный вклад в привнос осадочного материала составляют временные водотоки, ручьи, талые воды. В областях аридного типа литогенеза перенос материала осуществляется в основном ветром, а в озерах резко доминирует химическая седиментация. Карбонатные и органические составляющие переходят в твердую фазу и осаждаются в результате хемогенного и биохемогенного синтеза и физической аккумуляции под действием гидродинамических факторов [Шванов и др., 1998].

Ненарушенные донные осадки содержат «исторические записи» прошлых химических условий и позволяют установить фоновые уровни, с которыми можно сравнить и сопоставить существующие условия. Под влиянием изменения физико-химических и биологических условий (например, pH, Eh, растворенный кислород, бактериальная активность) связанные с донным осадком соединения могут переходить в водную форму, поступать в пищевую цепь и давать вторичные эффекты для водных обитателей. Некоторые относительно безвредные для окружающей среды неорганические вещества, разрушаясь или реагируя с другими, образуют растворимые потенциально токсичные формы. Таким образом, донный осадок, выступая накопителем загрязняющих веществ, должен исследоваться для определения их потенциального переноса [Линник, Набиванец, 1986; Мур, Рамамурти, 1987].

Изучение распределения U и Th в донных отложениях озер дает возможность оценить источники привноса вещества, степень его дифференциации. Согласно данным Н.А. Титаевой, концентрация радионуклидов в донных отложениях и отношение Th/U вблизи областей сноса отражают состав горных пород, подвергшихся выветриванию [Титаева, 2005]. В почвах концентрация естественных радионуклидов зависит от их содержания в подстилающих породах. По нашим данным и работам многих исследователей, распределение урана и тория в почвах в вертикальном профиле определяется характером и направленностью процесса почвообразования, свойственного той или иной биоклиматической зоне [Рихванов, 1996; Маликова и др., 2006]. Для почв природных ландшафтов значение Th/U меняется от 3 до 5, что соответствует соотношению в геологических образованиях [Рихванов, 1996]. При этом с повышением содержания в почвах тонких, пылевых частиц возрастает и содержание естественных радионуклидов.

Рассмотрение особенностей аккумуляции U и Th в озерных экосистемах с учетом ландшафтных обстановок позволит дать фоновые оценки для разных водосборов, что необходимо для выявления природных и техногенных аномалий.

Целью настоящей работы является изучение поведения естественных радионуклидов, радиоцезия и редкоземельных элементов в процессах транспортировки с водосборных площадей и осадения в

Рис. 1. Схема отбора проб.

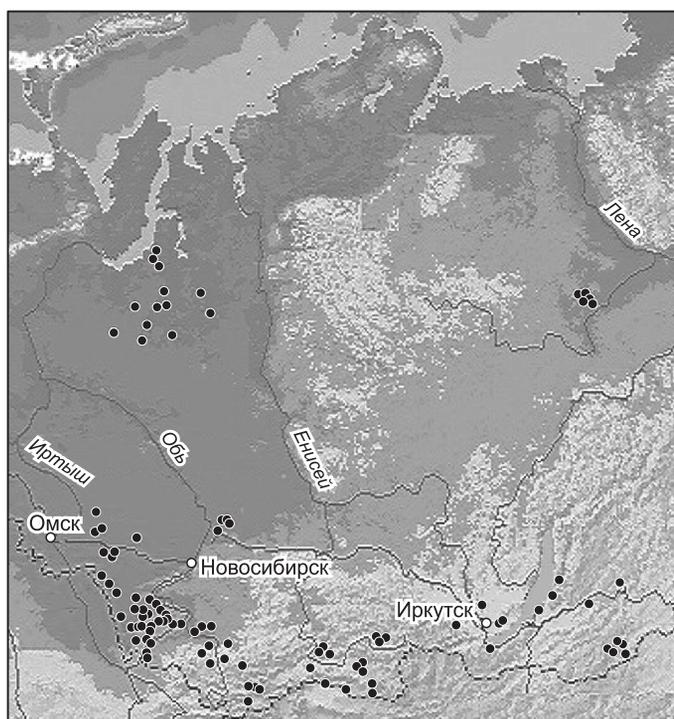
озерных отложениях в различных зонах Сибири, характеристика основных источников вещества и динамики изменения его потоков во времени, оценка геохимического фона естественных и искусственных радионуклидов в донных отложениях.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования послужили донные отложения озер Сибири, расположенных в трех крупнейших зонах Северной Азии: гумидной, аридной и семиаридной, а также в горных условиях (рис. 1) [История..., 1995].

Основная характеристика изученных озер приведена в табл. 1. Природно-ландшафтные условия озерных экосистем, главными из которых являются климат и рельеф, определяют долевое распределение форм миграции элементов и физико-химические условия отложения вещества. В областях холодного климата (пояс тундры и северной тайги) развиты пресные и ультрапресные воды. Заполнение озер происходит в период половодья снеготалыми водами с низкой минерализацией и малой буферной емкостью по рН. В изученных озерах Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) минерализация воды низкая, преобладают анионы карбонатной и гумусовой щелочности [Смоляков, 2000].

В областях умеренного климата (пояс южной тайги) воды также пресные, но минерализация их возрастает [Титаева, 2000]. Озера центральной части Республики Саха расположены в таежной полосе и относятся к пресным, но за счет более засушливого и значительно более сурового климата встречаются и солоноватые. Озера западного, восточного и южного побережий Байкала, Агинского Бурятского автономного округа, Республик Алтай и Тыва, расположенные в таежном или горном ландшафтах, в



Высота над уровнем моря
Низменность ————— Горы

Таблица 1. Характеристика минерализации вод озер из различных ландшафтно-климатических зон Сибири

Регион	Кол-во озер	Климат, ландшафтные зоны	Характеристика вод	Средняя минерализация воды, мг/л
Ямало-Ненецкий автономный округ	14	Холодная зона тундры и северной тайги	Пресные и ультрапресные	40
<i>Юг Западной Сибири, равнинная часть</i>				
Алтайский край	82	Умеренно засушливый	Соленые	122000
Новосибирская область	9	Лесостепной	Солоноватые	3900
Томская область	5	Степной	Пресные	360
<i>Горная часть</i>				
Алтайский край, Республика Алтай	8	Горный таежный	Пресные	480
Республика Тыва	12	Степной	»	100
»	11	»	Соленые и солоноватые	41500
»	10	Горный	Пресные	600
Республика Саха	6	Таежная зона	»	310
»	4	Засушливый	Солоноватые	1200
Иркутская область	10	Таежная зона	Ультрапресные	60
Республика Бурятия	5	Горный	Пресные	160
Агинский Бурятский автономный округ	8	Степной	Солоноватые	1300

основном пресные и даже ультрапресные, а в степной зоне пресные и солоноватые. На юге Западной Сибири озера в основном соленые или солоноватые, так как испарение с их поверхности во много раз выше, чем на севере. К аридной и семиаридной зонам относятся в основном все соленые озера Республики Тыва. В соответствии с климатом меняется и химический состав вод, так как по мере испарения происходит осаждение все более растворимых соединений: ультрапресные воды тундры имеют гидрокарбонатно-кальциевый состав, повышенное содержание Fe и SiO₂; в зоне тайги пресные воды имеют преимущественно гидрокарбонатно-кальциевый состав с большим количеством растворенного органического вещества; в лесостепной зоне за счет осаждения карбонатов, формируются воды сульфатно-гидрокарбонатного состава с переменным катионным составом и повышенными концентрациями хлоридов; в области степей в составе анионов преобладают SO₄²⁻ и Cl⁻.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Отбор проб донных отложений проведен пробоотборниками: цилиндрическим с лепестковым затвором или цилиндрическим с вакуумным затвором конструкции НПО «Тайфун» (диаметр 82 мм, длина 50 см), позволяющим извлекать илистые сильнообводненные осадки. Глубина изученных озер в основном попадает в интервал от 2 до 6 м. Пробоотбор донных отложений произведен на глубине 3—4 м и на расстоянии не ближе 100 м от берега. Керн донных отложений опробован поинтервально с шагом 3 см на глубину до 90 см. Осадок анализировался из навески стандартного объема (300 см³). Минеральный состав донных осадков определен методом рентгеноструктурного анализа. Зольность — путем прокаливания проб при 600 °С.

Пробы почв на водосборах озерных экосистем отбирались в информативных точках ландшафтов металлическим кольцом (высота 5 см, диаметр 8.2 см), что обеспечивает определение плотности проб для оценки запасов загрязнения радиоцезием (Ки/км²).

Естественные радиоактивные элементы (ЕРЭ) (U, Th, K) и ¹³⁷Cs определены гамма-спектрометрическим методом, причем уран определялся по активности радия, исходя из допущения о радиоактивном равновесии между ²³⁸U и дочерними продуктами его распада. Обоснованность этого подтверждена методом прямой гамма-спектрометрии радиоизотопа ²³⁴Th [Мельгунов, 2003].

Для датирования донных отложений использовались данные по активности радиоизотопов ¹³⁷Cs и ²¹⁰Pb. Этот метод, позволяющий оценить скорости современного осадконакопления, предложен в 1971 и в дальнейшем широко использовался нами и другими исследователями [Pennington et al., 1973; Davis et al., 1984; Гавшин и др., 1999; Маркелов и др., 2005]. Анализ на ²¹⁰Pb проведен гамма-спектрометрическим методом на планарном полупроводниковом детекторе с защитой от естественного излучения на основе особо чистых свинца и вольфрама.

Общепризнанным геохимическим индикатором является содержание и распределение редкоземельных элементов в осадочных породах [Балашов, 1976; Menager et al., 1992; Aubert et al., 2001; Шатов, 2006; и др.]. В типовых разрезах донных отложений озер с различным минеральным составом вод определены редкоземельные элементы (РЗЭ). Анализ проводился нейтронно-активационным методом (НАА). Погрешность определения содержания элементов обычно составляет 5—15 %.

Все аналитические работы выполнены в аккредитованной лаборатории геохимии редких элементов и экогеохимии ИГМ СО РАН по сертифицированным методикам.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Распределение радионуклидов в донных осадках озер и почвах их водосборных площадей. По данным рентгеноструктурного анализа донные осадки разделены на три группы: кварц-полевошпательные, карбонатные и рентгеноаморфные (органогенные). Нередко отмечается смешанный, минерально-органогенный тип отложений. При подсчете усредненных концентраций элементов в определенном типе минерального осадка озера со смешанным составом не учтены. Кварц-полевошпательные донные отложения являются продуктами механического разрушения пород, перенесенными и переотложенными. Все отобранные нами осадки имеют серо-зеленый или коричневый цвета, иногда запах сероводорода, высокую вязкость, массивную или орехово-скорлуповатую текстуру. В отложениях озер в основном верхние слои представлены пелитовыми илами с существенной примесью органического вещества. С глубиной (особенно с 25 см) убывает количество органического вещества и резко возрастает содержание песчаного материала. Часто по всему разрезу присутствует ракушечный детрит. Карбонатные осадки состоят из мелко- или тонкозернистого неплотного материала с высоким содержанием органического вещества в верхних слоях разреза. В минеральном составе преобладают: кальцит с переменным содержанием магния или стронция, доломит. Органогенные осадки в основном представлены сапропелями разного минерального состава. Зольность органогенных осадков варьирует от 20 до 60 %. Основная масса донных отложений изученных озер сформировалась в восстановительной обстановке: без серово-

Рис. 2. Отношения Th/U в донных отложениях озер (значки черного цвета) и почвах их водосборных площадей (значки серого цвета) в различных регионах Сибири.

1 — Читинская обл., 2 — Иркутская обл., 3 — Республика Тыва, 4 — ЯНАО, 5 — Республика Саха, 6 — Новосибирская обл., 7 — Алтайский край, 8 — Республика Алтай, 9 — Республика Бурятия, 10 — Томская обл.

дорода (глеевой) или сероводородной. В нескольких разрезах донных илов из озер разных ландшафтных зон наблюдается резкая смена структуры и состава осадка: органогенного ила на глинистый, органогенно-глинистого на песок, глинистого на ил карбонатного состава. Эта смена хорошо прослеживается по концентрациям в осадке макроэлементов (Ca, K, Na, Mg), радиоцезия, редких земель и слабо заметна по концентрациям естественных радионуклидов и микроэлементов.

Минимальные содержания Th и U в донных илах и почвах выявлены в озерных экосистемах северных районов Сибири (табл. 2), что согласуется с материалами для европейской части России [Титаева, 2000]. Содержание ЕРЭ в почвах, несомненно, связано с различным минеральным составом как почв, так и почвообразующих пород [Рихванов, 1996; Маликова и др., 2006]. По нашим данным, озерные илы по абсолютным значениям суммарной активности U(Ra), Th и K существенно не отличаются от почв водосборов (рис. 2).

Важными оценочными показателями миграции радионуклидов, состояния почв и донных осадков служат отношения Th/U, Th/K, Th-U-Ca и другие. Для изученных почв отношение Th/U в среднем равно трем. Th/U отношения в донных отложениях практически всегда ниже, чем в почвах водосборных площадей (рис. 3). Только несколько озерных экосистем имеют обратное соотношение, при этом все эти озера независимо от региона имеют низкую минерализацию воды и терригенный минеральный состав ила.

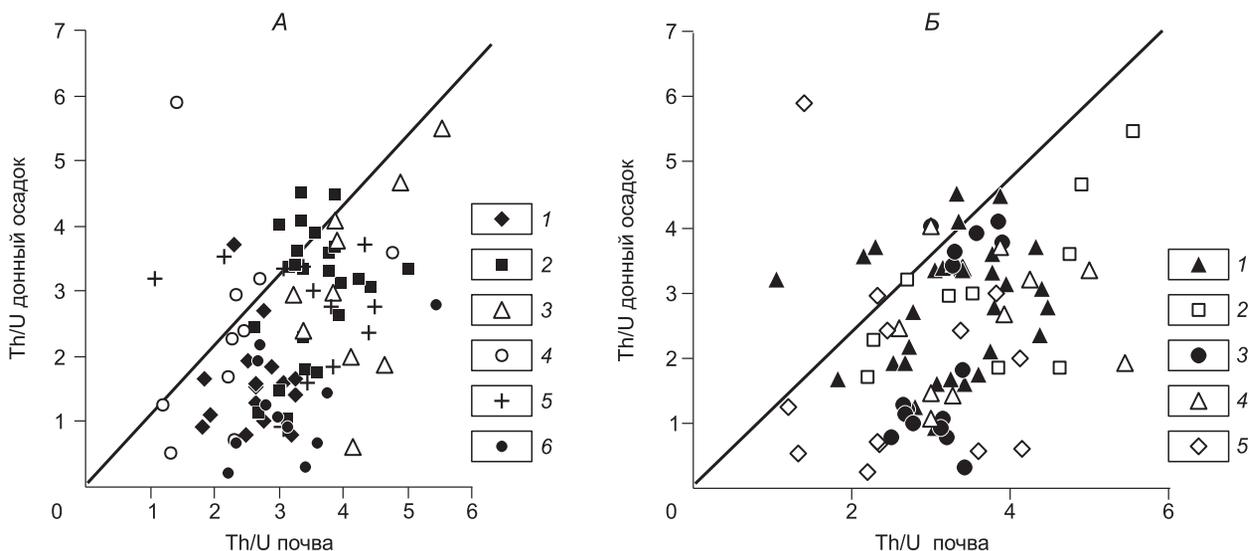
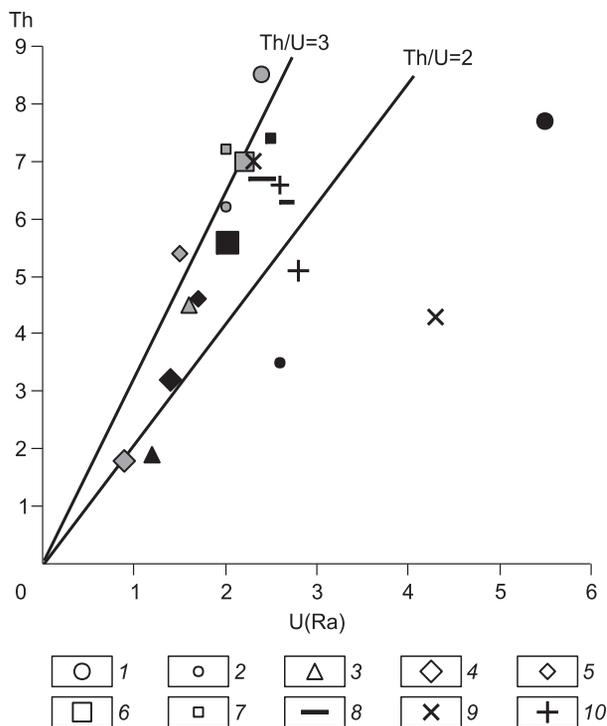


Рис. 3. Сравнение отношений Th/U в донных отложениях озер и в почвах их водосборных площадей в регионах Сибири (А) и минеральных типах осадков (Б).

А: 1 — Тыва, 2 — Алтайский край, 3 — Республика Саха, 4 — ЯНАО, 5 — Горный Алтай, 6 — Байкальский регион.
 Б: 1 — терригенный ил, 2 — терриген + органогенный ил, 3 — карбонатный ил, 4 — терриген + карбонатный ил, 5 — органогенный ил.

Таблица 2. Содержание естественных (U, Th, K) и искусственных (¹³⁷Cs) радионуклидов в донных отложениях озер и почв водосборных площадей в различных регионах Сибири

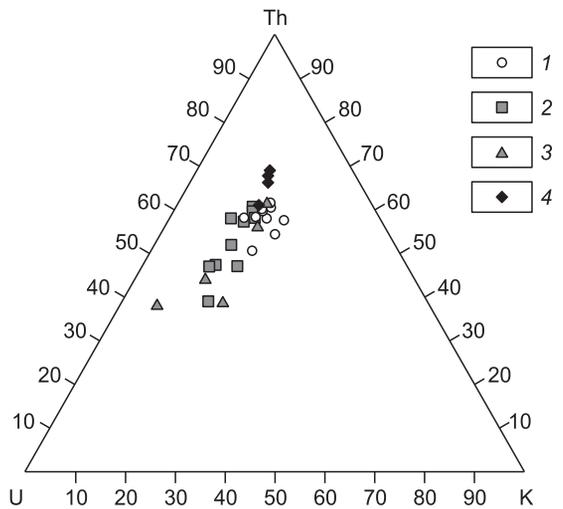
Регион	Компонент	Кол-во проб	U(Ra), г/г	Th, г/г	K, %	¹³⁷ Cs*, мКи/км ²
Агинский Бурятский автономный округ	Донные отложения	110	$\frac{5.5 \pm 0.6}{0.3-19}$	$\frac{7.7 \pm 0.4}{0-17.3}$	$\frac{1.9 \pm 0.1}{0.6-2.8}$	$\frac{57 \pm 2}{31-82}$
	Почва	153	$\frac{2.4 \pm 0.06}{0.4-6.05}$	$\frac{8.5 \pm 0.3}{1.5-22.4}$	$\frac{2.2 \pm 0.03}{0.2-3}$	$\frac{55 \pm 4}{5-178}$
Республика Бурятия	Донные отложения	123	$\frac{4.3 \pm 0.4}{1.5-13.5}$	$\frac{4.3 \pm 0.2}{1.9-8.8}$	$\frac{1.6 \pm 0.1}{0.01-4.1}$	$\frac{80 \pm 2}{0-1002}$
	Почва	198	$\frac{2.3 \pm 0.14}{0.7-7.52}$	$\frac{7.1 \pm 0.5}{1.0-17.7}$	$\frac{1.9 \pm 0.12}{0.01-3.7}$	$\frac{79 \pm 4}{15-190}$
Иркутская область	Донные отложения	108	$\frac{2.6 \pm 0.1}{0.2-8.2}$	$\frac{3.5 \pm 0.2}{0.05-8.4}$	$\frac{0.8 \pm 0.05}{0.2-4}$	$\frac{9 \pm 1}{0-20}$
	Почва	811	$\frac{2 \pm 0.04}{0.4-17.3}$	$\frac{6.2 \pm 0.1}{1.5-34.1}$	$\frac{1.5 \pm 0.01}{0.2-4}$	$\frac{38 \pm 2}{4-130}$
Республика Тыва	Донные отложения	197	$\frac{1.2 \pm 0.05}{0-3.5}$	$\frac{1.9 \pm 0.1}{0-7}$	$\frac{0.64 \pm 0.04}{0-2.42}$	$\frac{66 \pm 12}{5-332}$
	Почва	1081	$\frac{1.64}{0.6-4.1}$	$\frac{4.5}{0.8-9.8}$	$\frac{1.6}{0.4-3.2}$	$\frac{62}{0-108}$
Ямало-Ненецкий автономный округ	Донные отложения	256	$\frac{1.4 \pm 0.07}{0.7-2.3}$	$\frac{3.2 \pm 0.1}{1.8-4.8}$	$\frac{0.45 \pm 0.03}{0.2-0.6}$	$\frac{11 \pm 1}{12-89}$
	Почва	281	$\frac{0.9 \pm 0.03}{0.0-6}$	$\frac{1.8 \pm 0.1}{0.0-6}$	$\frac{0.6 \pm 0.03}{0.0-2.6}$	$\frac{18 \pm 2}{0-258}$
Республика Саха	Донные отложения	86	$\frac{1.7 \pm 0.1}{0-9.3}$	$\frac{4.6 \pm 0.2}{1.5-8.6}$	$\frac{1.1 \pm 0.08}{0-2.2}$	$\frac{12 \pm 2}{0-32}$
	Почва	191	$\frac{1.5 \pm 0.06}{0.4-3}$	$\frac{5.4 \pm 0.2}{1.7-8.1}$	$\frac{1.8 \pm 0.04}{1.4-2.1}$	$\frac{21 \pm 3}{19-25}$
Новосибирская область	Донные отложения	239	$\frac{2 \pm 0.06}{0-5.8}$	$\frac{5.6 \pm 0.2}{0-13}$	$\frac{1.23 \pm 0.04}{0-2.1}$	$\frac{66 \pm 18}{0-248}$
	Почва	1733	$\frac{2.2 \pm 0.01}{0.2-7}$	$\frac{7 \pm 0.02}{1.1-9.9}$	$\frac{1.6 \pm 0.01}{0.5-2.3}$	$\frac{67 \pm 4}{0-362}$
Алтайский край	Донные отложения	1209	$\frac{2.5 \pm 0.08}{0-15.5}$	$\frac{7.4 \pm 0.2}{0-18.9}$	$\frac{1.5 \pm 0.02}{0-6.1}$	$\frac{89 \pm 5}{18-404}$
	Почва	5034	$\frac{2 \pm 0.01}{0.0-9.0}$	$\frac{7.2 \pm 0.05}{0.0-42}$	$\frac{1.8 \pm 0.01}{0.0-9.5}$	$\frac{70 \pm 4}{0-386}$
Республика Алтай	Донные отложения	207	$\frac{2.6 \pm 0.1}{0.2-12.8}$	$\frac{6.3 \pm 0.2}{0-14.7}$	$\frac{1.3 \pm 0.04}{0.1-3.3}$	$\frac{77 \pm 5}{3-278}$
	Почва	1555	$\frac{2.4}{0.6-3}$	$\frac{6.7}{2.4-10.9}$	$\frac{1.6}{0.6-2.9}$	$\frac{69}{5-112}$
Лессовидные суглинки			2.4	7.7	1.7	Генерализованные типы почв [Смыслов, 1974]
Подзолистая			0.7	3.0	0.5	
Дерновоподзолистая			1.2	5.4	1.0	
Серая лесная			1.4	6.6	1.2	
Каштановая			2.1	9.1	1.8	
Известняки			1.7	1.8	0.8	Генерализованные типы осадочных пород [Гавшин, 1986]
Доломиты			2.2	2.6	0.7	
Терригенные			2.4	6.2	1.7	
Полевошпатовые пески			1.5	1.8	2.0	
Песчаники Западно-Сибирской плиты			1.3	4.8	2.1	
Алевропелиты Западно-Сибирской плиты			2.7	9.5	2.3	
Органогенные			4.4	3.4	0.5	

Примечание. Над чертой — среднее значение, под чертой — минимальное и максимальные значения.

* Данные пересчитаны на 2000 г.

Рис. 4. Соотношения калия (%), тория (г/т) и урана (г/т) в донных отложениях озер и почвах их водосбора в сравнении с генетическими типами почв [Рихванов, 1996] и осадочными породами [Гавшин, 1990].

Усредненный состав почв (1) и донных отложений озер (2) по регионам Сибири, генетические типы: 3 — состав известняков, доломитов, алевропелитов, терригенных осадочных пород; 4 — состав генерализованных типов почв: каштановая, серая лесная, дерново-подзолистая.



На диаграмме U(Ra)—Th—K показаны выведенные на большом аналитическом материале генерализованные соотношения калия, тория и урана для типов почв России и типов осадочных пород в сравнении с полученными нами данными (рис. 4). Почвы различных регионов Сибири довольно четко соответствуют генетическому типу — лессовидному суглинкам и обеднены торием относительно других распространенных в Сибирских регионах типов почв: серых лесных, дерново-подзолистых и каштановых. Усредненные составы донных отложений озер различных регионов Сибири располагаются на диаграмме фактически на одной прямой линии, и их состав меняется от карбонатных до алевропелитовых, в зависимости от того, какие осадки преобладают в озерах в регионе.

На диаграмме Ca(10⁻²)—Th—U нанесены соотношения этих элементов в донных илах с учетом их минерального состава (рис. 5). Можно выделить следующие закономерности: соотношение Th/U практически во всех озерных илах меняется в узком интервале от 3 до 1.8 независимо от региона и ландшафта расположения озера. При этом увеличение карбонатной составляющей в составе донных отложений уменьшает абсолютные значения Th и U, не изменяя соотношения Th/U (табл. 3). Увеличение органической составляющей влечет за собой в некоторых случаях повышение концентрации урана. Органические осадки четко разбиваются на две группы: первая — резко обогащенная ураном, и вторая группа — по величине Th/U соответствует терригенным и карбонатным осадкам.

Обращают на себя внимание различие геохимических особенностей урана и тория, в частности, их разная миграционная способность в поверхностных условиях. Уран является весьма подвижным элементом, образует гидратированные уранил-ионы UO₂⁺, устойчивые в окислительной обстановке. Осаждение урана происходит на восстановительных барьерах в условиях слабой аэрации. Торий — типичный элемент гидролизата, и миграция в растворе для него нехарактерна. Торий в основном мигрирует в виде тонких взвесей и в обломочном материале, и дальнейшее его осаждение связано, в отличие от урана, с терригенной (глинистой) составляющей [Титаева, 2000; Рихванов, 2004]. Обязательное условие для накопления урана органическим веществом — восстановительная обстановка, возникающая в результате окисления органики при затрудненном доступе воздуха (застойные водоемы). Содержания ЕРЭ в донных отложениях не зависят от степени минерализации воды озер (см. табл. 3).

Для большинства изученных регионов суммарные уровни загрязнения ¹³⁷Cs в донных отложениях озер Сибири и почвах их водосборных площадей соответствуют уровню глобального фона (40 мКи/км² на 2000 г.) [Дубасов и др., 1994; Израэль, 2006]. Только в трех регионах (Алтайский край, Республики Бурятия и Алтай) уровни загрязнения ¹³⁷Cs в 2—3 раза выше фоновых (см. табл. 2).

Неоднородность распределения ¹³⁷Cs в донных отложениях и почвенном покрове определяется влиянием многих факторов, из которых первичным является неравномерность выпадения атмосферных осадков в периоды ядерных испытаний. В дальнейшем имело место

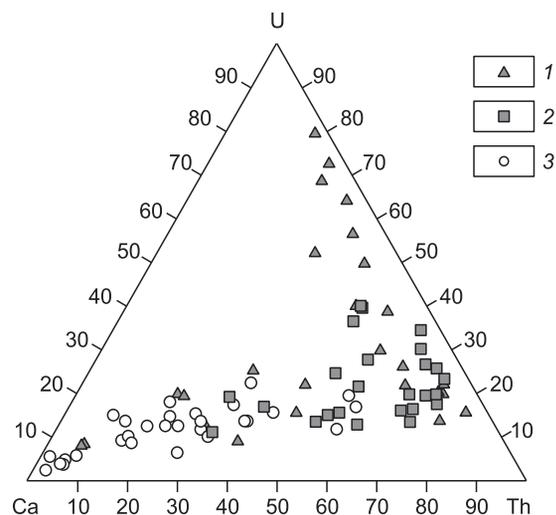


Рис. 5. Соотношения содержаний кальция (%), тория (г/т) и урана (г/т) в донных отложениях озер с учетом их минералогического состава.

Донные осадки: 1 — органические, 2 — терригенные, 3 — карбонатные.

Таблица 3. Усредненное содержание естественных радионуклидов в различных минеральных типах донных отложений при различной минерализации воды озер

Отложения	U(Ra), г/т	Th, г/т	K, %
Минеральный состав донных отложений			
Терригенные	2.3	6.2	1.5
Карбонатные	1.5	3.1	0.9
Органогенные	2.4	2.0	0.2
Минерализация воды			
Пресные	2.2	4.7	1.1
Соленые	2.2	4.9	1.2

феева-Ресовская, 1962; Троицкая и др., 1971; Моисеев, 1975; Цибульчик и др., 2000]. Также следует учитывать расположение водоема относительно основных источников долгоживущих радионуклидов.

Послойное изучение иловой залежи может дать представление о времени поступления материала в осадок. Для сопоставления распределения концентрации ^{137}Cs и ^{210}Pb в разрезах донных отложений выбрано несколько озер (рис. 6). Все отобранные нами для сопоставления осадки имеют кварц-полевошпатовый состав и массивную текстуру осадка. Верхние слои представлены пелитовыми илами с существенной примесью органического вещества. С глубиной убывает количество органического вещества и возрастает количество песка. Сопряженные графики распределения концентрации ^{137}Cs и ^{210}Pb позволяют определить возраст осадка, если соблюдаются следующие предположения: поток ^{210}Pb в осадки постоянен; скорость осадконакопления не меняется; постседиментационной миграции ^{210}Pb не происходит. Исходя из сделанных допущений, скорость осадконакопления в озерах Сибири: на юге равна 0.35, на севере — 0.25 см/год, т.е. полученные нами цифры соответствуют оценкам предыдущих исследований [Севостьянов, 1985; Михайлов, 1993].

Распределение естественных радиоактивных элементов по глубине донных отложений довольно однородно и неизменно на протяжении всего исследуемого временного интервала (около 300 лет) для всех регионов Сибири (рис. 7). Исключением из общего правила являются донные отложения озер эко-региона оз. Байкал. Так, для урана во многих озерах Байкальского региона отмечается пик максимальной концентрации на глубине около 20 см. Возможно, это связано с максимальной активностью в 1950—1960-х гг. разработки урановых месторождений Забайкалья.

Особенность распределения радиоцезия в усредненных вертикальных разрезах донных отложений озер Сибири заключается в увеличении концентрации ^{137}Cs к верхним интервалам, начиная с глубины 20—35 см, которая, согласно графикам распределения ^{210}Pb , соответствует началу ядерных испытаний на Семипалатинском полигоне. Такое распределение радиоцезия можно объяснить, с одной стороны, тем, что осаждающийся на дно детрит, неорганические частицы и остатки отмирающей биомассы увле-

изменение конфигурации первичных ореолов под влиянием эрозионно-аккумулятивных процессов и литохимической миграции. Как показано авторами в предыдущих работах, косвенным свидетельством большого значения этих процессов являются: аккумуляция «задержанного» радиоцезия в донных отложениях озер, весьма низкие запасы ^{137}Cs в пахотных землях, перераспределение его на участках лесных пожаров [Маликова и др., 2004; Щербов и др., 2006]. Однако мозаичное выпадение радиоактивных осадков и дальнейшее перераспределение радиоцезия в почвах — не единственные причины неоднородного распределения радионуклидов в донных илах. В целом осадки, обогащенные глинистым и органическим материалом, характеризуются более высокой активностью радиоцезия, чем песчаные [Тимо-

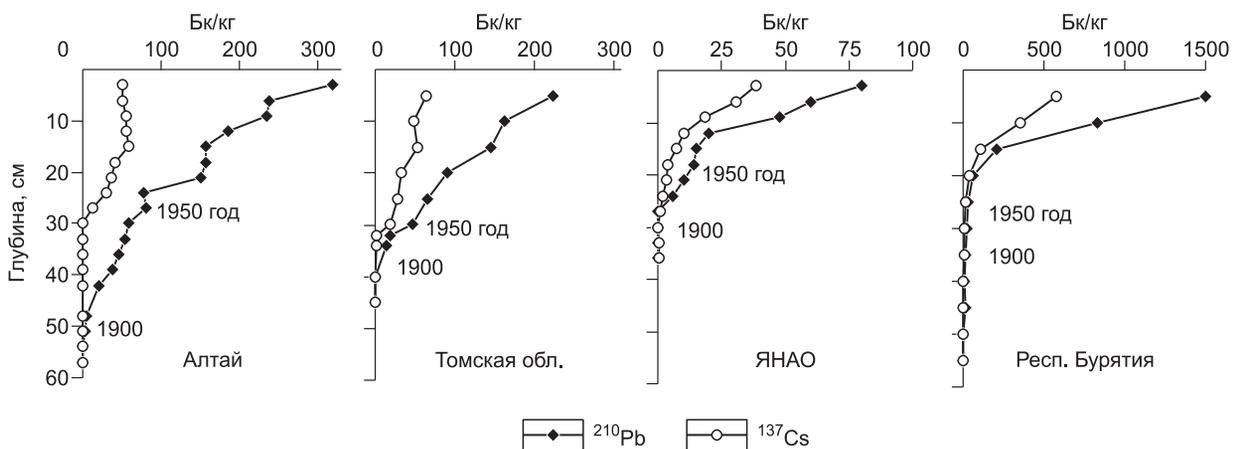


Рис. 6. Вертикальное распределение усредненных концентраций ^{137}Cs (Бк/кг) и ^{210}Pb (Бк/кг) в разрезах донных осадков озер.

Обобщены разрезы донных илов: Алтай — 4 озера, ЯНАО — 3 озера, Республика Бурятия — 2 озера, Томская обл. — 2 озера.

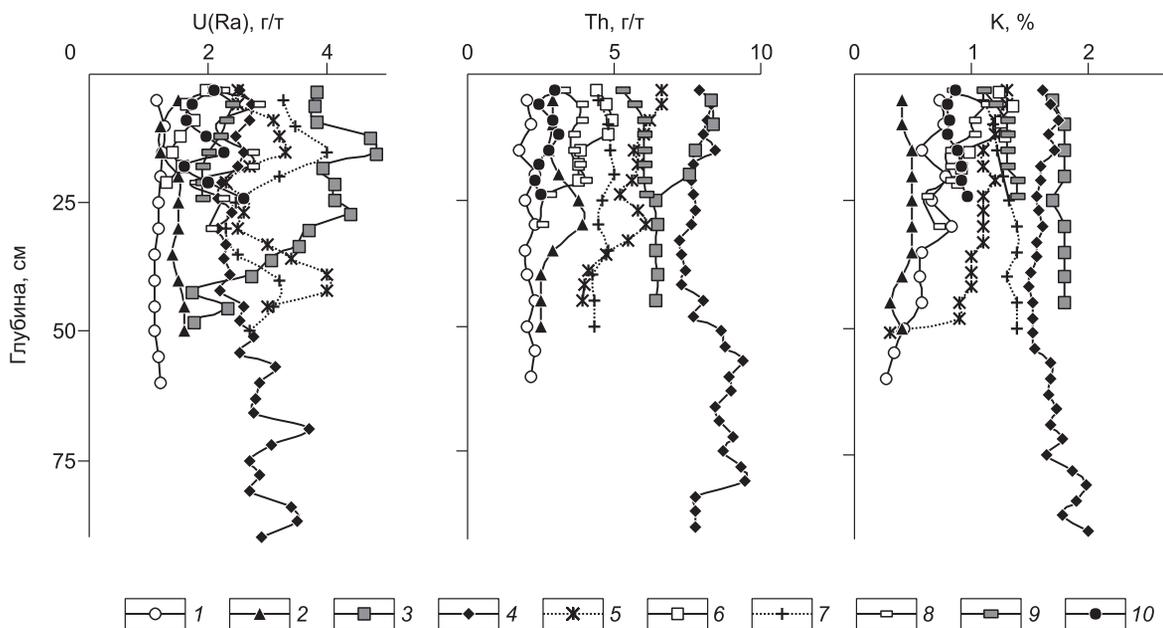


Рис. 7. Распределение естественных радионуклидов U(Ra) (г/т), Th (г/т) и K (%) в усредненных вертикальных разрезах донных отложений озер из различных водоемов Сибири

1 — Республика Тыва, 2 — ЯНАО, 3 — Читинская обл., 4 — Алтайский край, 5 — Республика Алтай, 6 — Республика Саха, 7 — Республика Бурятия, 8 — Иркутская обл., 9 — Новосибирская обл., 10 — Томская обл.

кают с собой на дно попавшие в водоем радионуклиды. Одновременно идет постоянное перераспределение на границе вода—дно и новое накопление корнями водных растений и бентосом. Отмирание биомассы сопровождается возвращением радиоцезия в донные отложения. С другой стороны, основная масса ^{137}Cs сконцентрирована в верхнем дерновом слое почв, и при его разрушении (распахивание, вытаптывание травы, пожары) происходит вторичное загрязнение осадков в результате привноса с площадей водосбора. Только на протяжении последних 20 лет (верхние горизонты от 0 до 8 см) в большинстве случаев происходит выравнивание и даже уменьшение поступления ^{137}Cs в донный осадок относительно предыдущих десятилетий (рис. 8).

Однако следует отметить, что существуют донные отложения озер со сложным характером распределения радиоцезия. Это озера, расположенные недалеко от полигонов в пределах следов ядерных взрывов. В их число попадает и оз. Кольванское. На его примере изучен характер распределения радиоцезия и естественных радионуклидов по акватории отдельного водоема в зависимости от ландшафта водосборной площади. Озеро расположено на стыке Горного и Степного Алтая. Площадь озера 4.5 км², берега сложены гранитами. Наличие впадающих и вытекающих водотоков создает слабопроточные условия, с заливами, имеющими застойный режим. Толщи донных отложений формируются за

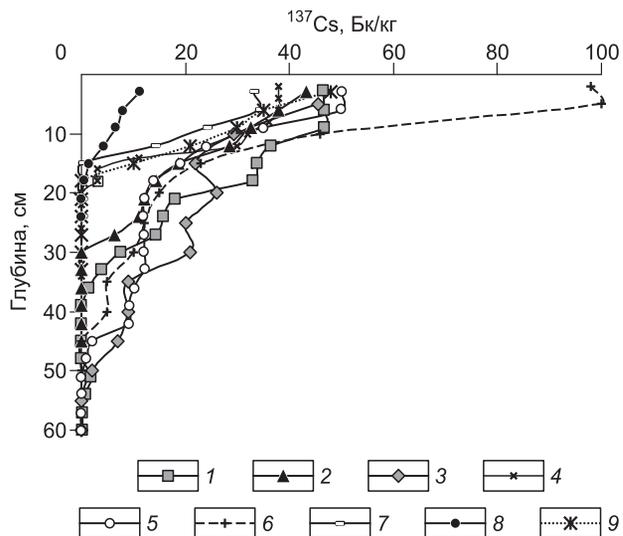


Рис. 8. Распределение радиоцезия (Бк/кг) в усредненных вертикальных разрезах донных отложений озер из различных регионов Сибири.

1 — Алтайский край — обобщено 68 разрезов из 32 озер, 2 — ЯНАО — 24 разреза из 18 озер, 3 — Республика Тыва — 32 разреза из 21 озера, 4 — Читинская область — 16 разрезов из 11 озер, 5 — Республика Алтай — 14 разрезов из 12 озер, 6 — Республика Бурятия — 11 разрезов из 6 озер, 7 — Новосибирская область — 17 разрезов из 11 озер, 8 — Республика Саха — 15 разрезов из 10 озер, 9 — Томская область — 14 разрезов из 7 озер.

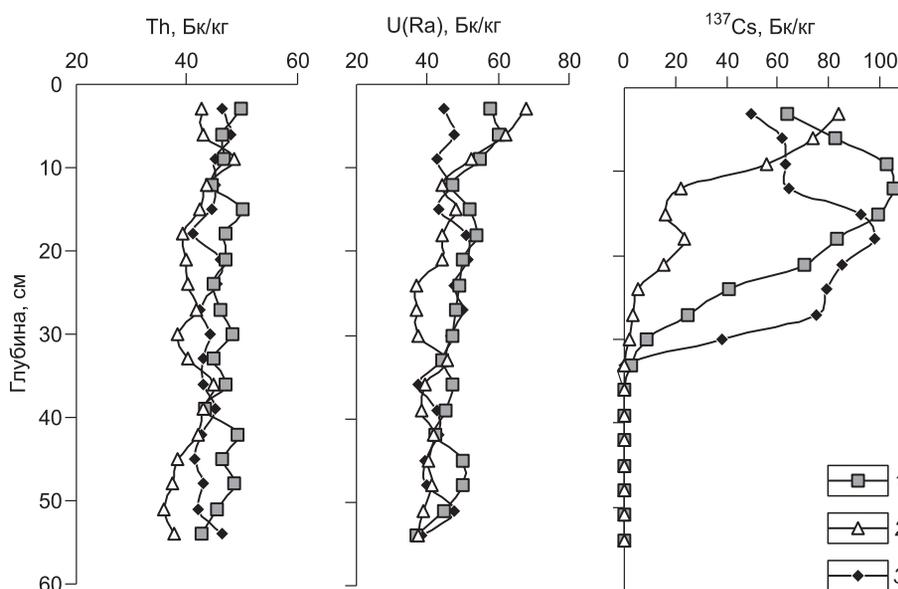


Рис. 9. Распределение Th, Бк/кг, U(Ra), Бк/кг, ^{137}Cs , Бк/кг в донных отложениях озера Колыванского в различных частях акватории: южный залив (1), северный залив (2) и проточная часть (3).

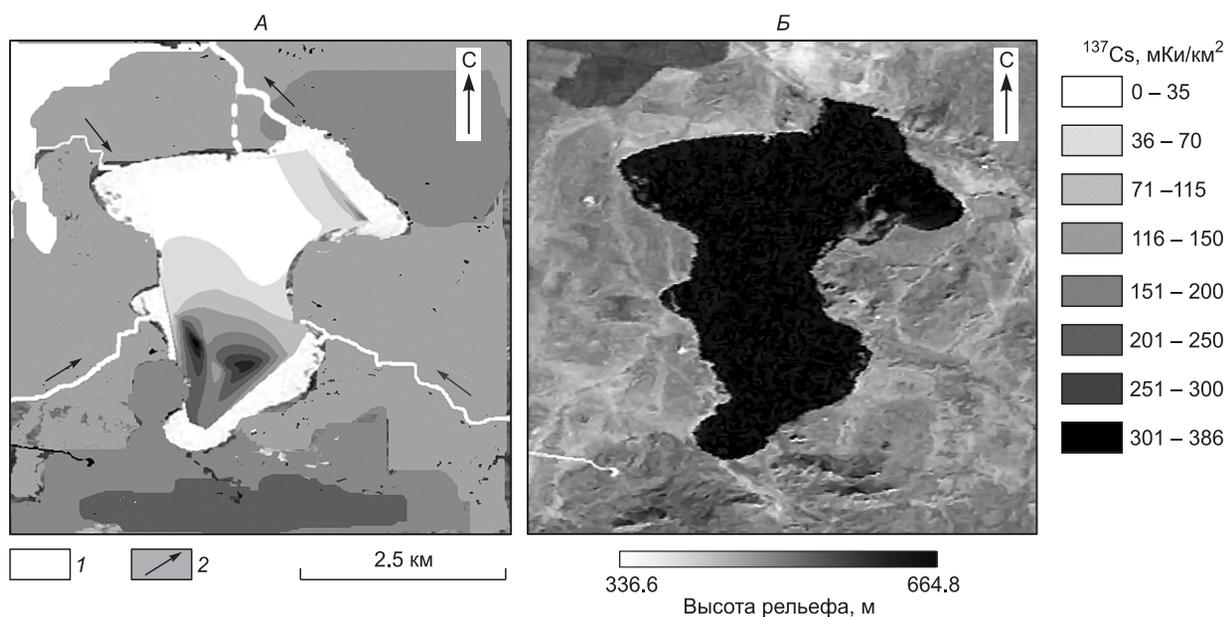


Рис. 10. Характер распределения запаса ^{137}Cs (мКи/км²) в донных отложениях Колыванского озера и в почвах водосборной площади (А) и космоснимок Колыванского озера (Б).

1 — гидросеть, 2 — направление течения.

счет привноса обломочного материала притоками озера, ветровым переносом выдуваемого из почв мелкозема, дождевыми и паводковыми потоками, отмиранием растительных организмов. Почвы водосборной площади представлены слабообразованными черноземами.

За период с 1992 по 2005 г. отобрано 23 колонки донных отложений, характеризующих различные режимы. Донные отложения, по данным рентгеноструктурного анализа, представлены: кварцем (основная фаза), слюдой, полевыми шпатами, смектитом и в различных количествах присутствует органическая составляющая (до 20 %). Южный и северо-восточный участки водоема относятся к акватории с застойным режимом (отобрано по пять скважин соответственно). ЕРЭ в пределах акватории озера и по вертикали донного разреза распределены равномерно, радиоцезий — мозаично (рис. 9).

Таблица 4. Усредненные содержания РЗЭ в различных минеральных типах донных отложений озер Сибири

Отложения	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Yb	Lu	Hf	ΣРЗЭ
Органогенные	6.8	14.8	5.4	1.1	0.3	1.2	0.2	0.5	0.1	1.1	31.5
Карбонатные	6.4	13.2	5.1	1.2	0.3	1.3	0.2	0.6	0.1	1.1	29.6
Кварц + полевошпат + глинистые	23.2	45.2	19.6	4.3	0.9	4.4	0.7	2.2	0.3	5.4	106.3

Зоны с высоким запасом ^{137}Cs (мКи/км²) приурочены к местам поступления терригенного материала с повышенных участков рельефа водосборной площади (с горных склонов) и к акваториям с застойным режимом (рис. 10).

Максимальная активность ^{137}Cs в донных отложениях озера обнаружена на глубине 21—25 см, находится в южной части акватории водоема и связана с поступлением ^{137}Cs от ядерного взрыва 1949 г. Высокие активности на глубинах от 21 до 15 см относятся к последующему активному поступлению ^{137}Cs с горных частей береговой линии (см. рис. 9).

Распределение редкоземельных элементов в донных отложениях. Общеизвестными геохимическими индикаторами для классификации и определения условий формирования геологических объектов служат редкоземельные элементы. Состав и содержание РЗЭ характеризуют специфику обстановки накопления и источники сноса вещества в донных отложениях озер [Интерпретация..., 2001]. РЗЭ определены в типовых разрезах донных отложений 22 озер с различным минеральным составом вод. Анализ РЗЭ в пробах донных отложений, представленных всеми минеральными типами, показал, что средние содержания РЗЭ в однотипных донных отложениях озер из различных регионов Сибири значительно не различаются. Существенно выделяются повышенными абсолютными значениями РЗЭ терригенные минеральные осадки (табл. 4), и практически нет различий по содержаниям РЗЭ между органогенными и карбонатными отложениями.

Характер распределения нормализованных по хондриту редкоземельных элементов в донных отложениях озер различных минеральных типов свидетельствует об отсутствии вариаций в трендах нормированных содержаний РЗЭ по типам осадка. Эти данные сопоставлены с аналогичными анали-

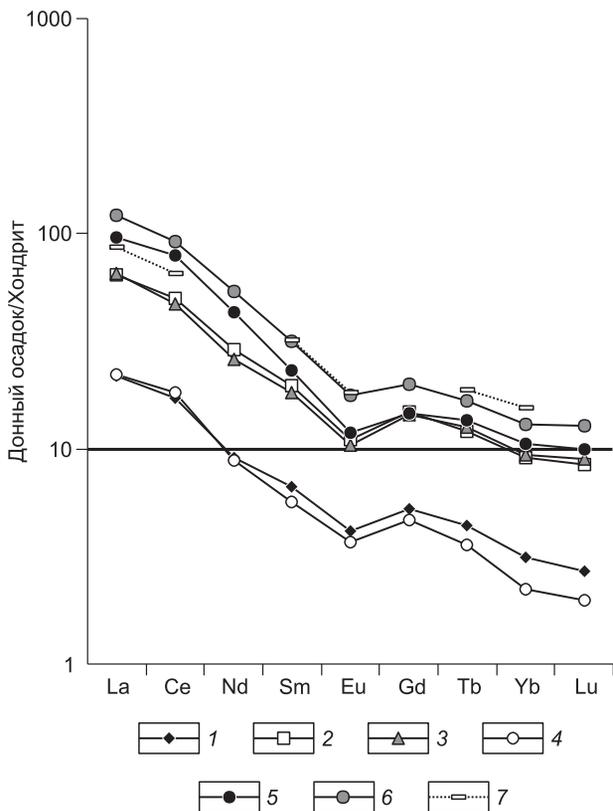


Рис. 11. Тренды нормализованных по хондриту усредненных содержаний РЗЭ различных минеральных типов донных отложений озер Сибири [Boynnton, 1984; Интерпретация..., 2001].

Типы: 1 — карбонатный (7 озер), 2 — кварц + п.ш. (6 озер), 3 — кварцевый (4 озера), 4 — органогенный (4 озера), 5 — верхняя континентальная кора, 6 — глина Русской платформы, 7 — бажениты.

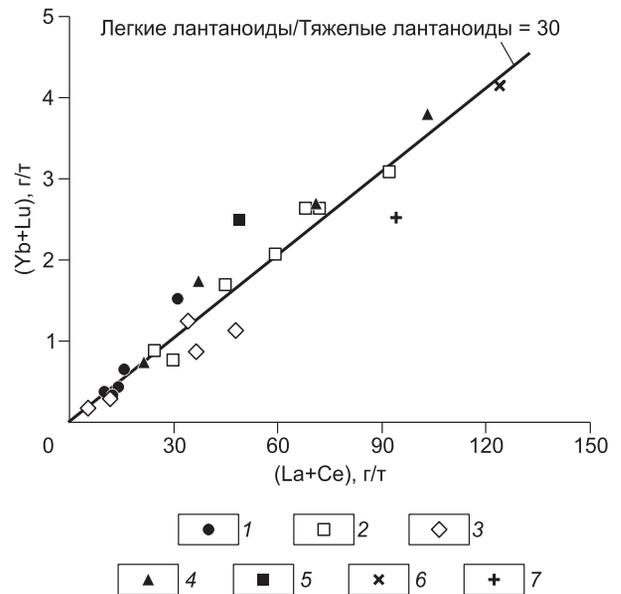


Рис. 12. Соотношение легких и тяжелых лантаноидов в различных минеральных типах донных осадков озер из разных регионов Сибири [Интерпретация..., 2001].

Типы: 1 — карбонатный, 2 — кварц + п.ш., 3 — органогенный, 4 — кварцевый, 5 — континентальная кора, 6 — мировой сланец, 7 — верхняя континентальная кора.

тическими данными из литературы (рис. 11) [Boynnton, 1984]. Они в целом соответствуют трендам для континентальной коры и глин Русской платформы, хотя органогенные и карбонатные осадки имеют существенно более низкие абсолютные значения. По геохимическим данным о дифференциации РЗЭ при современном выветривании, протекающем на суше, установлено относительное обогащение легкими РЗЭ обломочного комплекса, средними РЗЭ — сорбированного комплекса и тяжелыми лантаноидами и иттрием — растворенных РЗЭ речных вод. Эоловый перенос — второй источник терригенного материала и соответственно увеличения относительного содержания легких лантаноидов в донных отложениях [Балашов, 1976].

Согласно полученным трендам распределения РЗЭ в изученных донных отложениях озер, можно утверждать, что основным концентратором РЗЭ в донных отложениях является терригенная составляющая осадков. В карбонатных и органогенных осадках РЗЭ также связаны с тонкой фракцией обломочного комплекса. Этот вывод подтверждается резким обогащением всех осадков легкими лантаноидами (рис. 12).

ВЫВОДЫ

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

Содержание радионуклидов в донных осадках озер Сибири отражает их концентрации в почвах водосборных площадей и могут рассматриваться как фоновые для этих территорий.

Содержания U, Th и K в донных осадках изученных озер не зависят от степени минерализации вод и существенно различаются в разных типах отложений. Отмечаются высокие концентрации урана в органогенных илах, осаждающихся в восстановительной обстановке при нейтральном или слабощелочном pH. Значения Th/U в донных осадках ниже, чем в почвах водосборных площадей.

Использование ^{210}Pb и ^{137}Cs в качестве меток для оценки темпов эрозионно-аккумулятивных процессов позволило рассчитать скорости осадконакопления в озерах различных регионов Сибири: на юге — 0.35, на севере — 0.25—0.3 см/год.

Распределение естественных радиоактивных элементов в донных отложениях озер довольно равномерно для всех регионов Сибири, что свидетельствует о стабильности процессов осадкообразования.

Суммарный уровень загрязнения ^{137}Cs донных отложений озер Сибири соответствует уровню глобального фона (40 мКи/км² на 2000 г.), но в трех регионах (Алтайский край, Республики Бурятия и Алтай) он превышен в 2 раза.

Неоднородность распределения остаточных запасов радиоцезия как по площади, так и во временном интервале отмечается не только в донных отложениях озер из различных регионов Сибири, но и в пределах акватории отдельно взятого озера.

Особенность распределения радиоцезия в усредненных вертикальных разрезах донных отложений озер из различных водоемов Сибири заключается в увеличении концентрации ^{137}Cs к верхним интервалам, начиная с глубины 20—35 см, что соответствует началу испытания ядерного оружия на полигонах.

Характер распределения редкоземельных элементов в донных отложениях озер разных минеральных типов соответствует трендам для континентальной коры и глин Русской платформы, хотя в органогенных и карбонатных осадках абсолютные их значения существенно ниже, чем в терригенных. Основным концентратором РЗЭ в донных отложениях озер является пелитовая фракция.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 09-05-00137.

ЛИТЕРАТУРА

Балашов Ю.А. Геохимия редкоземельных элементов. М., Наука, 1976, 267 с.

Бобров В.А., Калугин И.А., Клеркс Ж., Дучков А.Д., Щербов Б.Л., Степин А.С. Современная скорость осадконакопления в Телецком озере по данным гамма-спектрометрии (^{137}Cs) // Геология и геофизика, 1999, т. 40 (4), с. 530—536.

Гавшин В.М. Естественная радиоактивность. Осадочные породы. Новосибирск, Наука, 1990, 169 с.

Гавшин В.М., Никитин И.А. Радиогеохимическая специфика осадочных толщ Сибирской платформы. Новосибирск, ИГиГ СО АН СССР, 1986, 126 с.

Гавшин В.М., Щербов Б.Л., Мельгунов М.С., Страховенко В.Д., Бобров В.А., Цибульчик В.М. ^{137}Cs и ^{210}Pb в озерных отложениях степного Алтая как показатели динамики антропогенных изменений геохимического фона на протяжении XX века // Геология и геофизика, 1999, т. 40 (9), с. 1331—1341.

Добровольский В.В. Проблемы водной миграции масс тяжелых металлов в биосфере // Доклады II Международной научно-практической конференции «Тяжелые металлы, радионуклиды и элементы-биофилы в окружающей среде». Семипалатинск, 2002, т. 1, с. 24—34.

Драбкова В.Г., Сорокина И.Н. Озеро и его водосбор — единая природная система. Л., Наука, 1979, 195 с.

Дубасов Ю.В., Думик В.П., Зеленцов С.А., Красилов Г.А., Логачев В.А., Матущенко А.М., Смагулов С.Г. Хронология ядерных испытаний, проведенных СССР в атмосфере, космическом пространстве и под водой (1949—1962 гг.) // Бюл. ЦОИ по атомной энергии, 1994, № 1, с. 18—29.

Дубинин А.В. Геохимия редкоземельных элементов в океане. М., Наука, 2006, 360 с.

Израэль Ю.Ф. Антропогенное радиоактивное загрязнение планеты Земля // Радиоактивность после ядерных взрывов и аварий // Труды Международной конференции, Москва, 5—6 декабря 2005 г. М., 2006, т. 1, с. 13—49.

Интерпретация геохимических данных / Ред. Е.В. Скляров. М., Интернет Инжиниринг, 2001, 288 с.

История озер Севера Азии. Сер. История озер. СПб., Наука, 1995, 288 с.

Коган Р.М., Назаров И.М., Фридман Ш.Д. Основы гамма-спектрометрии природных сред. М., Энергоатомиздат, 1991, 366 с.

Линник П.Н., Набиванец Б.И. Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах. Л., Гидрометеоздат, 1986, 270 с.

Маликова И.Н., Щербов Б.Л., Страховенко В.Д., Сухоруков Ф.В. Радиоцезий в почвенно-растительном покрове Алтайского региона к началу XXI века // Труды II Международной конференции. Томск, 20—23 окт. 2004 г. Томск, Изд-во ТПУ, с. 342—345.

Маликова И.Н., Цибульчик В.М., Страховенко В.Д., Щербов Б.Л. Уран, торий и радиоцезий в почвах Новосибирской и Кемеровской областей // Материалы IV Международной научно-практической конференции «Тяжелые металлы и радионуклиды в окружающей среде», Семипалатинский государственный педагогический институт, 19—21 октября 2006 года. Т-1. Семипалатинск, 2006, т. 2, 79—87.

Маркелов М.В., Голосов В.Н., Стукин Е.Д. Возможности использования ^{210}Pb и ^{137}Cs в качестве радиоактивных меток для оценки темпов эрозионно-аккумулятивных процессов // Метеорология и гидрология, 2005, № 4, с. 66—84.

Мельгунов М.С., Гавшин В.М., Сухоруков Ф.В., Калугин И.А., Бобров В.А., Клеркс Дж. Аномалии радиоактивности на южном побережье озера Иссык-Куль (Кыргызстан) // Химия в интересах устойчивого развития, 2003, № 6, с. 1—8.

Михайлов Н.Н. Загрязнение донных осадков некоторых озер Алтайского края. Ядерные испытания, окружающая среда и здоровье населения Алтайского края. Т. II, кн. 2. Барнаул, Изд-во АГУ, 1993, с. 28—44.

Моисеев А.А., Рамзаев П.В. Цезий-137 в биосфере. М., Атомиздат, 1975, 182 с.

Мур Дж.В., Рамамурти С. Тяжелые металлы в природных водах. М., Мир, 1987, 285 с.

Общие закономерности возникновения и развития озер. Методы изучения истории озер. Сер. История озер. Л., Наука, 1986, 254 с.

Перельман А.И. Геохимия природных вод. М., Наука, 1982, 154 с.

Поползин А.Г. Озера юга Обь-Иртышского бассейна (зональная комплексная характеристика). Новосибирск, Зап.-Сиб. кн. изд-во, 1967, 339 с.

Рихванов Л.П. Уран и торий в почвах. Материалы международной конференции, посвященной столетию со дня открытия явления радиоактивности и столетию Томского политехнического университета, 22—24 мая 1996 г. Томск, Изд. ТПУ, 1996, с. 308—313.

Рихванов Л.П. Радиоактивные элементы в геосферных оболочках // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Материалы II Международной конференции, Томск, 18—22 октября 2004 г. Томск, Тандем-Арт, 2004, с. 498—506.

Севостьянов Д.В. Основные черты эволюции горных озер в голоцене. Палеолимнология озер в аридных и гумидных зонах. Л., Наука, 1985, с. 29—61.

Смоляков Б.С. Проблема кислотных выпадений на севере Западной Сибири // Сибирский экологический журнал, № 1, 2000, с. 21—30.

Смыслов А.А. Уран и торий в земной коре. Л., Недра, 1974, 231 с.

Тимофеева-Ресовская Е.А., Агафонов Б.М., Тимофеев-Ресовский Н.В. О судьбе радиоизотопов в водоемах // Тр. Ин-та биологии УФ АН СССР, № 22, 1962, с. 49—67.

Титаева Н.А. Ядерная геохимия. М., Изд-во Моск. ун-та, 2000, 336 с.

Титаева Н.А. Геохимия природных радиоактивных рядов распада. М., ГЕОС, 2005, 226 с.

Троицкая М.Н., Рамзаев П.В., Моисеев А.А. Радиоэкология ландшафтов Крайнего Севера // Современные проблемы радиобиологии. Т. 2. Радиоэкология. М., Атомиздат, 1971, с. 325—353.

Цибульчик В.М., Маликов Ю.И., Аношин Г.Н., Степин А.С. ^{137}Cs в донных осадках и затопленных почвах Новосибирского водохранилища // Тяжелые металлы и радионуклиды в окружающей среде: Сб. ведущих докладов Международной научно-практической конференции, 9—11 февраля 2000 г. Семипалатинск, 2002, с. 268—273.

Шатров В.А. Редкоземельные элементы как индикаторы условий образования осадочных пород палеозоя—мезозоя (на примере осадочного чехла Воронежской антеклизы) // Осадочные процессы, седиментогенез, литогенез, рудогенез (эволюция, типизация, диагностика, моделирование). Материалы 4-го Всерос. литологич. совещания, Москва, 7—9 ноября 2006. М., ГЕОС, 2006, т. 1, с. 385—388.

Шванов В.Н., Фролов В.Т., Сергеева Э.И., Драгунов В.И., Патрунов Д.К., Кузнецов В.Г., Белицкая Г.А., Куриленко В.В. Систематика и классификации осадочных пород и их аналогов. СПб., Недра, 1998, 352 с.

Шевченко В.П. Влияние аэрозолей на среду и морское осадконакопление в Арктике. М., Наука, 2006, 232 с.

Щербов Б.Л., Андросова Н.В., Иванова Л.Д., Маликов Ю.И., Страховенко В.Д. Тяжелые металлы и техногенный радионуклид Cs-137 в донных отложениях Телецкого озера // Геология и геофизика, 1997, т. 38 (9), с. 1497—1508.

Щербов Б.Л., Будашкина В.В., Страховенко В.Д. Миграция искусственных радионуклидов и тяжелых металлов при лесных пожарах в Сибири // Проблемы биогеохимии и геохимической экологии, 2006, № 1 (1), с. 113—121.

Aubert D., Stille P., Probst A. REE fractionation during granite weathering and renewal by waters and suspended leads: Sr and Nd isotopic evidence // Geochim. Cosmochim. Acta, 2001, v. 65, № 3, p. 387—406.

Boynton W.V. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies / Ed. P. Henderson. Rare earth element geochemistry. Amsterdam, Elsevier, 1984, p. 63—114.

Davis R.B., Hess C.T., Norton S.A., Hanson D.W., Hoagland K.D., Andersson D.S. ^{137}Cs and ^{210}Pb dating of sediments from soft-water lakes in New England (USA) and Scandinavia, a failure of ^{137}Cs dating // Chem. Geol., 1984, v. 44, p. 151—185

Gavshin V.M., Sukhorukov F.V., Bobrov V.A., Melgunov M.S., Miroshnichenko L.V., Klerkx J., Kovalev S., Romashkin P.A. Chemical composition of the uranium storages at Kadji-Sai (Southern shore of Issyk-Kul Lake, Kyrgyzstan) // Water, Air and Soil Pollution, 154, 2004, p. 71—83.

Menager M.T., Menet C., Petit J.-C., Cathelineau M., Come B. Dispersion of U, Th and REE by water-rock interaction around an intragranitic U-vein, Jalerys Mine, Mor-Van, France // Appl. Geochem., № 1, 1992, 239—252.

Pennington W., Cambray R.S., Fisher E.M. Observation on lake sediments using fallout ^{137}Cs as a tracer / Nature, 1973, v. 242, p. 324—326.

*Рекомендована к печати 16 ноября 2009 г.
Г.Н. Аношиным*

*Поступила в редакцию 29 апреля 2009 г.,
после доработки — 7 сентября 2009 г.*