

УДК 546:631.445.152(571.53)

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПРОФИЛЕ АЛЛЮВИАЛЬНОЙ ЛУГОВОЙ ПОЧВЫ ЗАЛИВА КУРКУТЫ ОЗ. БАЙКАЛ

© 2023 г. О. В. Зарубина

*Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН
664033 Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия*

E-mail: zarub@igc.irk.ru

Поступила в редакцию 22.02.2023 г.

После доработки 26.03.2023 г.

Принята к публикации 15.05.2023 г.

Представлены результаты валового содержания редкоземельных элементов по профилю аллювиальной луговой почвы залива Куркуты оз. Байкал (Иркутская обл., Прибайкалье). Установлено, что максимальное содержание легких редкоземельных элементов находится в верхнем горизонте Ап. Содержание тяжелых редкоземельных элементов по профилю разрезов распределено равномерно и их максимальное количество сосредоточено в основном в горизонтах А и В.

Ключевые слова: аллювиальная луговая почва, редкоземельные элементы (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb и Lu), масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой.

DOI: 10.31857/S0002188123080124, **EDN:** ZEPZCC

ВВЕДЕНИЕ

Почвы Прибайкалья являются уникальным объектом для изучения содержания, распределения и поведения редкоземельных элементов (РЗЭ). В регионе развиты топливно-энергетический, агропромышленный комплексы, также последние годы очень сильно стал развиваться туризм. Интенсивное использование природных ресурсов вызвало изменение циклов химических элементов в биосфере, темпов миграции, зон выноса и накопления. Значительная доля элементов попадает в почву, которая служит их аккумулятором и прочно фиксируется в плодородном слое [1–5]. Особенностью РЗЭ является их совместное нахождение в земной коре, где преобладают минералы редкоземельных элементов цериевой подгруппы, содержание которых составляет около $10^{-3}\%$ [6–10]. Концентрация РЗЭ в почвах зависит от почвообразующей породы, степени ее выветренности, генезиса почв, содержания глинистых минералов, органического вещества и варьирует в пределах 0.2–87.6 мг/кг почвы [3].

В условиях резко континентального климата верхние горизонты обеднены РЗЭ по сравнению с почвообразующей породой [4, 7]. Согласно литературным данным РЗЭ мигрируют из верхних кислых горизонтов в более глубокие, осаждаются

во вторичных минералах в различных частях почвенного профиля, содержащих марганцевые и фосфорные конкреции, глинистая фракция почв наиболее обогащена РЗЭ. Показано, что количество вымываемых из почвы РЗЭ коррелирует с количеством вымываемых железа и марганца [11–14]. В качестве субстрата для материнской породы в аллювиальных почвах служат гомогенизированные и отсортированные в ходе разрушения продукты различных пород. Почти во всех работах, посвященных редкоземельным элементам в почвах, делается акцент на первостепенном влиянии исходного состава почвообразующей породы на содержание в ней исследованных веществ. К фактам возможного неравномерного накопления РЗЭ в аллювиальных почвах можно отнести и то, что затопляемые во время паводков участки выполняют функции барьера в отношении веществ, мигрирующих с постоянными и временными, поверхностными и внутрипочвенными водотоками [1, 4, 10, 15, 16].

К редкоземельным элементам относятся 15 химических элементов от лантана до лютеция [2, 3, 6]. Данное название группа химических элементов получила в связи с тем, что они (элементы) редко встречаются в земной коре и подразделяются на 2 группы: легкие редкоземельные элементы (атомная масса < 153) или элементы “цери-

ево́й” подгруппы La, Ce, Pr, Nd, Sm и Eu; тяжелые редкоземельные элементы (атомная масса >153) или элементы “иттриевой” подгруппы Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb и Lu.

До недавнего времени изучение содержания, распределения и поведения редкоземельных элементов в природных объектах было затруднено из-за низкой чувствительности применяемых приборов и отсутствием стандартных образцов. Применение масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой дало возможность для изучения всех 15-ти РЗЭ в почвах [12, 13]. Цель работы – изучение распределения редкоземельных элементов в профиле аллювиальной луговой почвы залива Куркуты оз. Байкал (Иркутская обл., Прибайкалье), сведения о содержании которых практически отсутствуют.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования были аллювиальные луговые почвы, сформированные на аллювии и делювии магматических и метаморфических горных пород [1, 5]. Исследованные почвы находятся в зоне транспортного и туристического воздействия. Для отбора проб почвы были выбраны участки с отсутствием следов сильного антропогенного воздействия. Отбор проб почвы проводили в сентябре согласно общепринятым в почвоведении методам. Исследование проводили методом прикопок с шагом в 50 м с глубины 15 см. Отбор образцов с небольших глубин обоснован тем, что бо́льшая часть привнесенных элементов концентрируется в верхнем почвенном горизонте. Почвенные разрезы закладывали в разных частях исследованной территории (разрезы 1, 2), генетические горизонты выделяли визуально, отбирали пробы массой ≈1000 г через 10–15 см в каждом горизонте. Отобранный материал сохраняли в естественно-влажном состоянии, затем сушили до воздушно-сухого состояния в лабораторных условиях во избежание потерь химически неустойчивых и летучих элементов и их соединений. Морфологическое описание аллювиальной луговой почвы, взятой для исследования следующее.

Разрез № 1 заложен в 650 м в пойме Куркутского залива оз. Байкал (Иркутская обл.). Растительность: осока, мятлик луговой, ромашка, горошек, полынь.

Горизонт Ап на глубине 2–7 см, глубина взятия образца – 4 см, светло-серый, рыхлый, сухой легкий суглинок, пылит; включения: обильные корни растений, встречаются гравелиты, характер перехода резкий по цвету и плотности, граница перехода волнистая, слабо вскипает от HCl.

Горизонт А на глубине 7–20 см, глубина взятия образца – 10 см, серовато-коричневый, сухой, уплотнен и пылит, слабокомковатой структуры легкий суглинок; включения: галька и корни растений, характер перехода постепенный по цвету и плотности, не вскипает от HCl. Горизонт А на глубине 20–60 см, глубина взятия образца – 30 и 40 см, коричневый с серыми включениями до 15 см, сухой, средний суглинок, очень плотный; включения: галька по всему горизонту, но меньше, чем в верхнем горизонте, слабо вскипает от HCl. Горизонт В1 на глубине 60–100 см, глубина взятия образца – 50 и 60 см, серовато-коричневый, сухой, средний суглинок, очень плотный, комковатый; включения серого цвета по всему горизонту, но меньше, чем в верхнем горизонте, не вскипает от HCl. Горизонт В2 на глубине 100–130 см, глубина взятия образца – 120 см, серовато-коричневый однородный, сухой, средний суглинок, очень плотный; включения: галька от 5 см по всему горизонту. Горизонт С на глубине 130–150 см, глубина взятия образца – 140 см, коричневый однородный, влажный, супесь, очень плотный; включения: мелкие камни.

Разрез № 2 заложен в 250 м в пойме Куркутского залива оз. Байкал (Иркутская обл.). Растительность: осока, мятлик луговой, горошек.

Горизонт Ап на глубине 2–5 см, глубина взятия образца – 3 см, светло-серый, рыхлый, сухой легкий суглинок, пылит; включения: обильные корни растений, характер перехода резкий по цвету и плотности, граница перехода волнистая, слабо вскипает от HCl. Горизонт А на глубине 5–25 см, глубина взятия образца – 10 см, серовато-коричневый, сухой, уплотнен и пылит, слабокомковатой структуры легкий суглинок; включения: галька и корни растений, характер перехода постепенный по цвету и плотности, слабо вскипает от HCl. Горизонт А на глубине 25–50 см, глубина взятия образца – 40 см, коричневый с серыми включениями до 15 см, сухой, слабый суглинок, очень плотный, включения: галька по всему горизонту, но меньше, чем в верхнем горизонте, не вскипает от HCl. Горизонт В на глубине 50–110 см, глубина взятия образца – 70 и 80 см, серовато-коричневый, сухой, опесчаненный суглинок, очень плотный, комковатый, включения серого цвета по всему горизонту, но меньше, чем в верхнем горизонте, не вскипает от HCl. Горизонт С на глубину 110–130 см, глубина взятия образца – 120 см, коричневый однородный, влажный, супесь, очень плотный; включения: мелкие камни.

Анализ почвенных прикопок ($n = 9$) показал, что почвенный покров однороден и представлен аллювиальной луговой почвой.

Таблица 1. Основные параметры для съемки NexION 300D (Perkin Elmer)

Инструмент	NexION 300D (Perkin Elmer)
Входная мощность ВЧ-генератор	1500 Вт
Расходы газовых потоков (Ar):	
транспортирующего	1.2 л мин ⁻¹
охлаждающего	18 л мин ⁻¹
вспомогательного	1.2 л мин ⁻¹
Реакционный газ для KED ячейки (He)	2.5 л мин ⁻¹
Реакционный газ для DRC ячейки (NH ₃)	0.6 л мин ⁻¹
Распылитель	Meinhard, концентрический
Распылительная камера	кварцевая
Время подвода образца	80 с
Время регистрация спектра	150–200 с
Время промывки	120–240 с (3% HNO ₃)
Чувствительность (имп/сек на 1 нг мл ⁻¹)	Mg 24 138069 Co 59 34833 Pb 208 39106
Внутренний стандарт	Rh 103 (10 нг мл ⁻¹)
Относительное стандартное отклонение интенсивности (RSD) за 1 ч	Mg 24 1.67 Pb 208 0.4
Отношение CeO : Ce Ce ⁺⁺ : Ce ⁺	0.024 0.014

Для определения содержания редкоземельных элементов использовали метод масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Это высокочувствительный метод, который дает возможность получить рекордно низкие пределы обнаружения определяемых элементов [13]. Измерения выполняли по аттестованной методике [8]. Определение содержаний РЗЭ в почвах выполнено при помощи современного квадрупольного масс-спектрометра NexION 300D (Perkin Elmer, США) на базе Центра коллективного пользования (ЦКП) “Изотопно-геохимических исследований”.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Инструментальная часть. Перед началом измерений проводили настройку прибора и оптимизацию инструментальных параметров с целью получения максимальной величины аналитического сигнала и его стабильности при минимальном вкладе в сигнал оксидных и двухзарядных ионов, низком фоновом уровне. Выбор способа градуировки обусловлен необходимостью одновременно определить максимально возможное количество элементов в одном растворе и учесть матричные помехи. В связи с этим применяли

внешнюю градуировку по раствору Tuning Solution (“tune”) с концентрацией 1 ppb следующих элементов: Ba, Be, Ce, Co, In, Mg, Pb, Rh, U (табл. 1).

Для расчета концентраций использовали градуировку по сертифицированным растворам CLMS-1-4 фирмы SPEX (США) с концентрациями элементов 0.1, 1.0, 5.0 нг/мл с контролем дрейфа сигнала по внутреннему стандарту, в качестве которого выбран ¹⁰³Rh. Нивелирование матричного эффекта достигали путем разбавления готовых растворов проб для анализа в 10000 раз.

Для перевода анализируемого раствора в аэрозоль использовали концентрический низкотоковый распылитель Meinhard (0.1 мл/мин). Пределы обнаружения (ПО) оценивали по 3σ-критерию: $ПО = C_{\text{контр}} + 3\sigma$, где $C_{\text{контр}}$ – величина среднего контрольного опыта, σ – среднеквадратичное отклонение его измерения по данным, полученным для контрольных проб. Величины ПО, полученные для растворов, пересчитывали на содержание в твердом веществе с учетом фактора разбавления.

Для решения задачи обеспечения правильности полученных результатов применяли стандартные образцы почв (Китай) GSS-11, 14 и 16.

Таблица 2. Установленные и аттестационные значения для стандартных образцов почв, GSS-11, 14 и 16 (Китай), мг/кг

Элемент	ПО	GSS-11		GSS-14		GSS-16	
		$C_{cp} \pm \Delta$	$C_{атт} \pm \Delta$	$C_{cp} \pm \Delta$	$C_{атт} \pm \Delta$	$C_{cp} \pm \Delta$	$C_{атт} \pm \Delta$
La	0.1	36 ± 0.004	34 ± 2	43 ± 0.03	41 ± 2	71 ± 0.02	67 ± 3
Ce	0.2	66 ± 3.19	65 ± 3	83 ± 0.18	80 ± 2	140 ± 0.81	133 ± 5
Pr	0.01	8.0 ± 0.03	7.9 ± 0.5	9.5 ± 0.08	9.2 ± 0.6	15.4 ± 0.42	14.6 ± 1.1
Nd	0.07	31 ± 0.79	30 ± 2	38 ± 1.34	36 ± 3	60 ± 1.2	57 ± 4
Sm	0.03	5.7 ± 0.13	5.5 ± 0.2	6.5 ± 0.21	6.4 ± 0.3	10.5 ± 0.40	10.4 ± 0.5
Eu	0.01	1.16 ± 0.08	1.18 ± 0.04	1.47 ± 0.02	1.36 ± 0.06	1.61 ± 0.02	1.66 ± 0.07
Gd	0.03	4.9 ± 0.05	4.7 ± 0.3	5.9 ± 0.05	5.5 ± 0.5	8.7 ± 0.06	8.5 ± 0.7
Tb	0.005	0.77 ± 0.03	0.76 ± 0.05	0.89 ± 0.01	0.87 ± 0.06	1.3 ± 0.02	1.3 ± 0.1
Dy	0.02	4.4 ± 0.17	4.2 ± 0.4	5.1 ± 0.22	4.8 ± 0.3	7.7 ± 0.14	7.4 ± 0.5
Ho	0.005	0.85 ± 0.07	0.89 ± 0.05	0.97 ± 0.06	0.93 ± 0.04	1.53 ± 0.07	1.41 ± 0.08
Er	0.07	2.57 ± 0.07	2.46 ± 0.07	2.8 ± 0.12	2.6 ± 0.3	3.7 ± 0.26	3.8 ± 0.2
Tm	0.005	0.41 ± 0.01	0.38 ± 0.03	0.43 ± 0.01	0.41 ± 0.03	0.59 ± 0.01	0.57 ± 0.05
Yb	0.02	2.63 ± 0.02	2.54 ± 0.13	2.66 ± 0.05	2.53 ± 0.12	4.06 ± 0.02	3.80 ± 0.2
Lu	0.004	0.42 ± 0.01	0.41 ± 0.02	0.44 ± 0.01	0.42 ± 0.02	0.58 ± 0.02	0.58 ± 0.05

Для каждого стандартного образца при соответствующих условиях анализа находили соотношение $C_{cp} : C_{атт}$, где C_{cp} – полученное среднее содержание, $C_{атт}$ – аттестованные показатели. В табл. 2 представлены результаты полученных показателей $C_{cp} \pm \Delta$, где доверительный интервал ($\pm \Delta$) оценивали при $P = 0.95$ и аттестованные величины $C_{атт} \pm \Delta$ ($\pm \Delta$ – погрешность аттестации).

Для РЗЭ дополнительным показателем правильности анализа могут служить нормализованные по образцу PAAS (Постархейский австралийский сланец) или образцу RPSC (глины Русской платформы) кривые распределения, которые являются одним из основных инструментов геохимических исследований природных процессов [14, 17]. Отношения содержаний (проба : хондрит) в большинстве случаев имеют плавные распределения от La до Lu, за исключением возможных аномалий Eu (иногда Ce). На рис. 1 представлены составы РЗЭ, нормализованные по RPSC, из которых видно, что полученные данные дают сопоставимые кривые распределения РЗЭ с аттестованными показателями.

Химическая пробоподготовка. Образцы почв (навеска 100 мг), имеющие в своем составе органическое вещество и тугоплавкие минералы, сплавляли с безводным метаборатом лития (400 мг) в течение 3 мин в стеклоглеродных тиглях марки СУ-2000 при температуре 1150°C в высокочастотной индукционной печи ВЧГ-4 (Таганрогский завод электротехнического оборудования), с по-

следующем и согласна следующим разложением плавня смесью перегнанных кислот HF и HNO₃ и отгонкой SiF₄, окончательный фактор разведения основного раствора пробы составлял 1000 раз [8].

Двойную и тройную перегонку кислот осуществляли последовательно в системах глубокой очистки кислот: в subPUR/duo PUR Milestone microwave laboratory systems, затем в Savillex DST-1000 sub-boiling Distillation System User's Manual. Кислотность всех готовых к ИСП-МС-анализу растворов составляла 2–3% HNO₃. Для приготовления всех растворов (промывочных, градуировочных, анализируемых и контроля) использовали сверхчистую воду, очищенную с помощью аппарата Milli Q (Millipore SAS, Франция), дозировка и раздача сверхчистой воды через дозатор Q-POD (первой степени чистоты).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Метод масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой был использован при изучении содержания редкоземельных элементов аллювиальной луговой почвы Прибайкалья. В табл. 3 приведены данные предела обнаружения, средние содержания для исследованной почвы, средние содержания для почв мира [3, 9] по литературным данным редкоземельных элементов, данные для аллювиальной луговой почвы Забайкалья [7] и геохимические кларки редкоземельных элементов для верхней континентальной коры [14, 17].

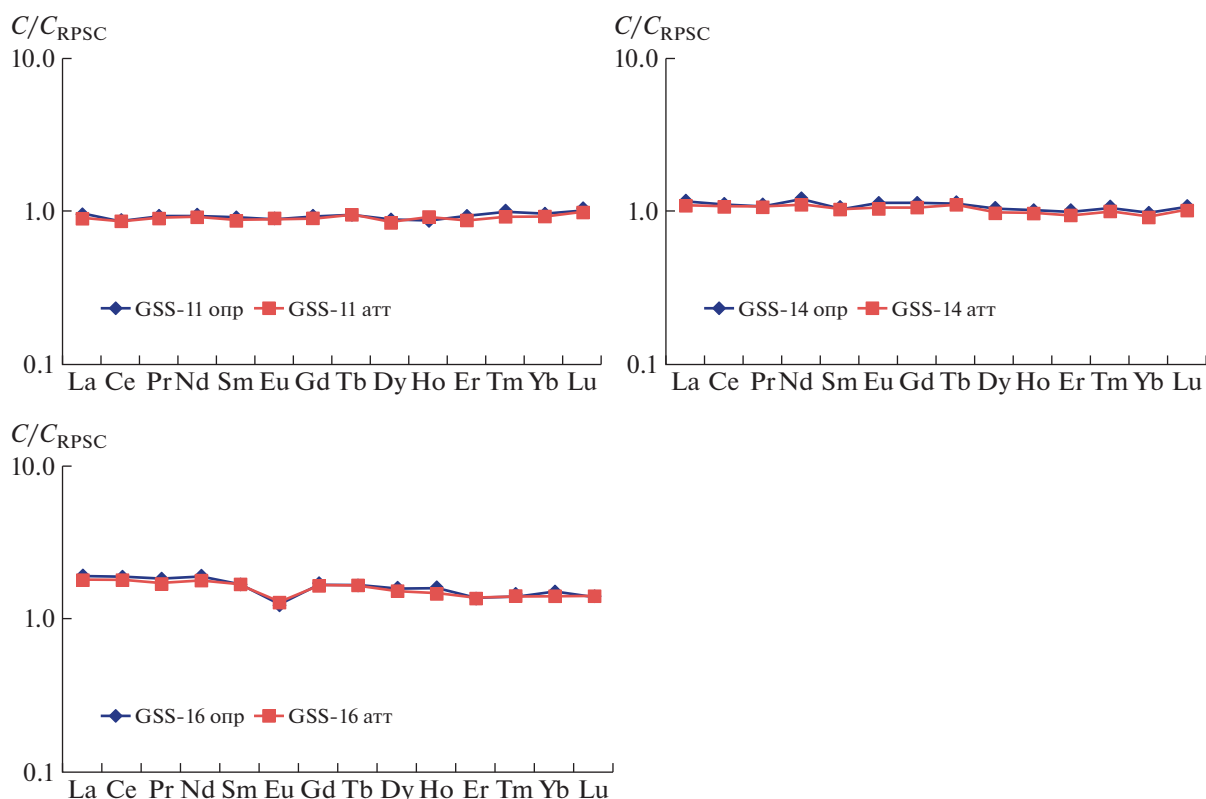


Рис. 1. Составы РЗЭ, нормализованные по RPSC [14, 17] в стандартных образцах почв GSS-11, 14 и 16 для аттестованных и установленных показателей.

Содержание лантана в аллювиальной луговой почве значительно варьировало по профилю разрезов 1 и 2 (рис. 2а). В верхнем горизонте Ап содержание La составило 17–23 мг/кг и его содержание с глубиной постепенно уменьшалось до 6 мг/кг почвы (гор. С), в горизонтах А и В отмечено снижение содержания лантана до 9.1 и 7.8 мг/кг почвы соответственно. Возможно, подобный характер распределения лантана по профилю аллювиальной луговой почвы был обусловлен снижением содержания органического вещества и постепенным его вымыванием в нижние горизонты В1 и В2 на глубину до 60 см.

Повышенные концентрации церия в почве отличались по профилю от элементов группы легких редкоземельных в несколько раз: лантана – в 2 раза, прозеодима – в 8 раз, неодима – в 2 раза, самария – в 9.5 раза, европия – в 17 раз и гадолиния – в 5 раз. Даже по сравнению с тяжелыми редкоземельными элементами содержание церия было больше в десятки раз.

Содержание самария в исследованной почве составило от 3.0 до 5.7 мг/кг, что было в несколько раз меньше содержания неодима, лантана и церия. Максимальный уровень накопления самария

соответствовал верхнему горизонту А, что возможно также было связано с содержанием органического вещества и постепенным вымыванием самария с органической составляющей в нижние горизонты В1 и В2 на глубину до 70 см.

Легкие редкоземельные элементы имеют сходство по контрастности дифференциации между собой в генетических горизонтах исследованной аллювиальной луговой почвы (рис. 2а) [11].

В исследованной аллювиальной луговой почве концентрация тяжелых редкоземельных элементов варьировала по профилю разрезов 1 и 2 (рис. 2б). Максимум накопления Gd, Dy, Er и Yb в профиле разрезов 1 и 2 почв приходился на горизонты А и В глубиной до 50–80 см. В верхнем горизонте Ап максимальное содержание гадолиния достигало 5.4, диспрозия – 7.4, эрбия – 4.9 и итербия – 4.4 мг/кг, и с глубиной постепенно концентрация элементов увеличивалась до горизонта А (Gd – 6.9, Dy – 7.9, Er – 5.2 и Yb – 4.8 мг/кг почвы), в нижнем горизонте С их содержание снижалось и составило: Gd – 4.2, Dy – 4.9, Er – 3.2 и Yb – 3.0 мг/кг почвы.

Содержание Tb, Ho, Tm и Lu по профилю разрезов было распределено равномерно и их макси-

Таблица 3. Пределы обнаружения и среднее содержание редкоземельных элементов аллювиальной луговой почвы, по результатам масс-спектрометрического с индуктивно-связанной плазмой метода анализа, мг/кг

	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
ПО	0.1	0.2	0.01	0.07	0.03	0.01	0.03	0.005	0.02	0.005	0.07	0.005	0.02	0.004
Горизонт (см)	Разрез 1													
Ап (0–7)	23	49	5.6	23	5.1	1.4	5.4	0.82	5.3	1.1	3.3	0.46	3.0	0.49
А (7–20)	15	35	4.5	20	5.2	1.5	6.4	1.0	6.9	1.5	4.5	0.72	4.4	0.67
А (20–60)	9.1	23	3.2	15	4.6	1.4	6.5	1.1	7.3	1.6	4.9	0.69	4.5	0.71
А (20–60)	8.2	21	3.0	15	4.7	1.4	6.9	1.2	7.9	1.6	5.2	0.76	4.8	0.76
В1 (60–100)	7.8	20	2.9	14	4.4	1.5	6.2	1.0	7.4	1.6	5.1	0.72	4.7	0.73
В1 (60–100)	10	23	2.7	11	3.0	1.1	3.5	0.56	3.8	0.8	2.4	0.37	2.5	0.38
В2 (100–130)	8.3	23	3.1	16	5.2	1.3	6.6	1.2	7.7	1.6	4.6	0.67	4.4	0.70
С (130–150)	9.0	21	2.7	12	3.4	1.2	4.2	0.70	4.9	1.1	3.2	0.45	3.0	0.51
Горизонт (см)	Разрез 2													
Ап (0–5)	17	39	4.2	20	5.1	1.5	6.1	1.0	7.3	1.1	4.9	0.5	3.4	0.7
А (5–25)	8.1	28	3.9	15	4.7	1.4	6.2	1.1	7.4	1.9	4.9	0.7	3.5	0.7
А (25–50)	8.8	22	3.3	14	4.4	1.5	5.9	1.1	7.5	1.1	4.9	0.5	3.7	0.6
В (50–110)	11	21	2.9	12	3.0	1.1	3.5	0.6	3.9	0.9	2.4	0.4	2.5	0.5
В (50–110)	7.3	26	2.7	15	5.2	1.3	6.6	1.2	7.7	0.6	4.7	0.6	2.4	0.5
С (110–130)	6.0	24	2.1	13	3.5	1.2	4.3	0.7	4.9	0.7	3.2	0.5	3.0	0.5
Горизонт (см)	Прикопки (n = 9)													
Ап (0–25)	14	43	5.2	22	5.7	1.7	6.9	1.1	6.7	1.4	4.4	0.6	4.1	0.6
	По литературным данным													
Почвы мира [3, 9]	13.9–56.3	21.2–75.7	–	16.5–56.0	3.3–11.9	0.69–3.21	–	0.49–1.66	–	–	–	–	1.57–3.66	0.24–0.52
Аллювиальная луговая Забайкалье [7]	28.3–49.7	34.8–51.2	–	14.3–23.4	5.8–8.2	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Верхняя континентальная кора [14, 17]	30	64	7.1	26	4.5	0.88	3.8	0.64	3.5	0.8	2.3	0.33	2.2	0.32

Примечание. Прочерк – нет данных.

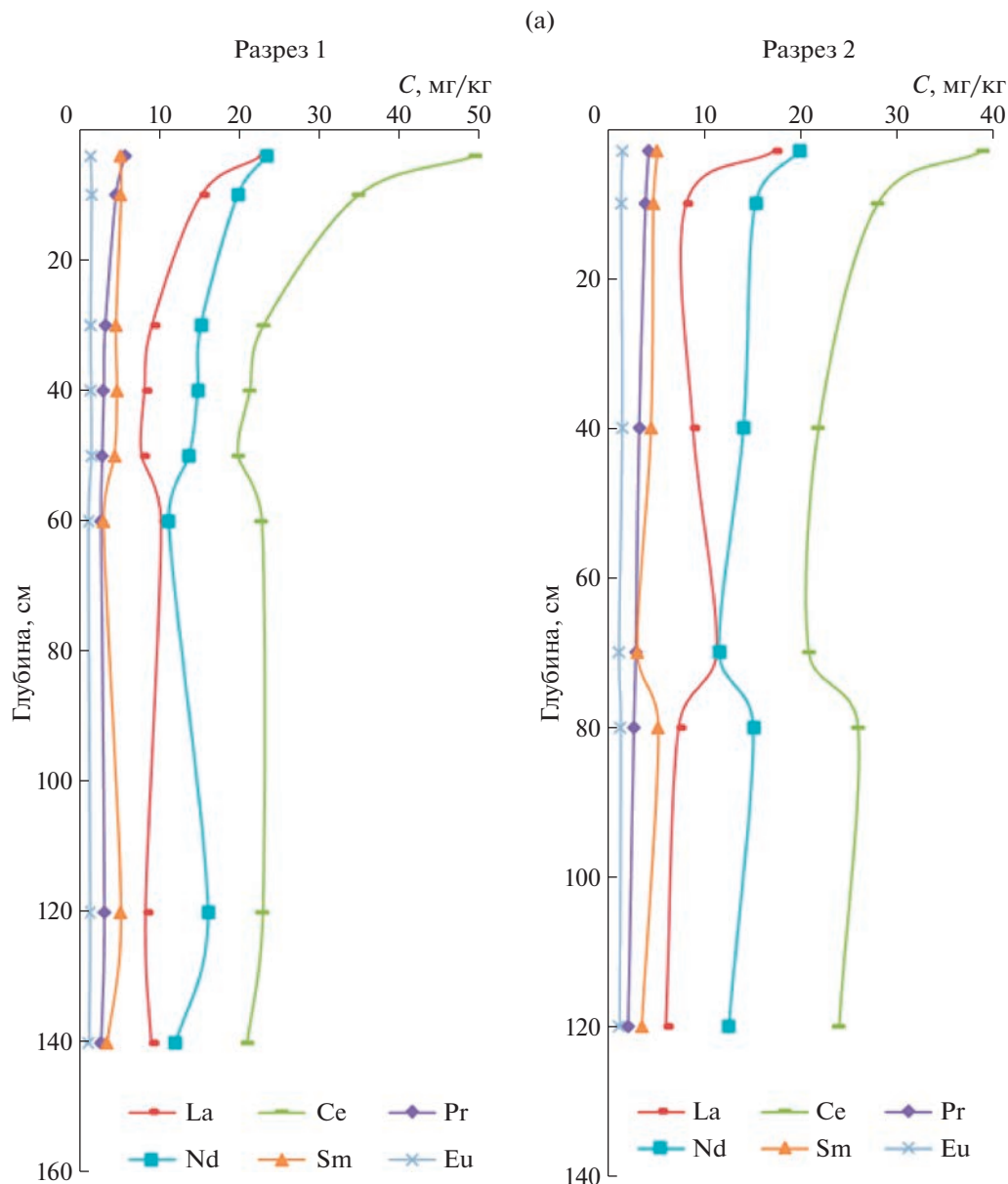


Рис. 2. Распределение легких (а) и тяжелых (б) редкоземельных элементов в профиле аллювиальной луговой почвы по данным масс-спектрометрического метода анализа.

мальное количество обнаружено в основном в горизонтах А или В: Tb – 1.2, Ho – 1.9, Tm – 0.8 и Lu – 0.7 мг/кг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено содержание редкоземельных элементов в аллювиальной луговой почве залива Куркуты оз. Байкал с использованием современного высокоточного масс-спектрометрического метода анализа. По данным анализов, установлены закономерности накопления и распределения РЗЭ в вертикальном разрезе, зависящие от геохи-

мической характеристики элементов, генетических особенностей и вертикальной миграции. Легкие редкоземельные элементы имели сходство по контрастности дифференциации между собой в генетических горизонтах исследованной аллювиальной луговой почвы.

Содержание лантана значительно варьировало по профилю разрезов, а концентрация церия отличалась от всей группы редкоземельных элементов в несколько раз: лантана – в 2 раза, празеодима – в 8 раз, неодима – в 2 раза, самария – в 9.5 раза, европия – в 17 раз и гадолиния – в 5 раз.

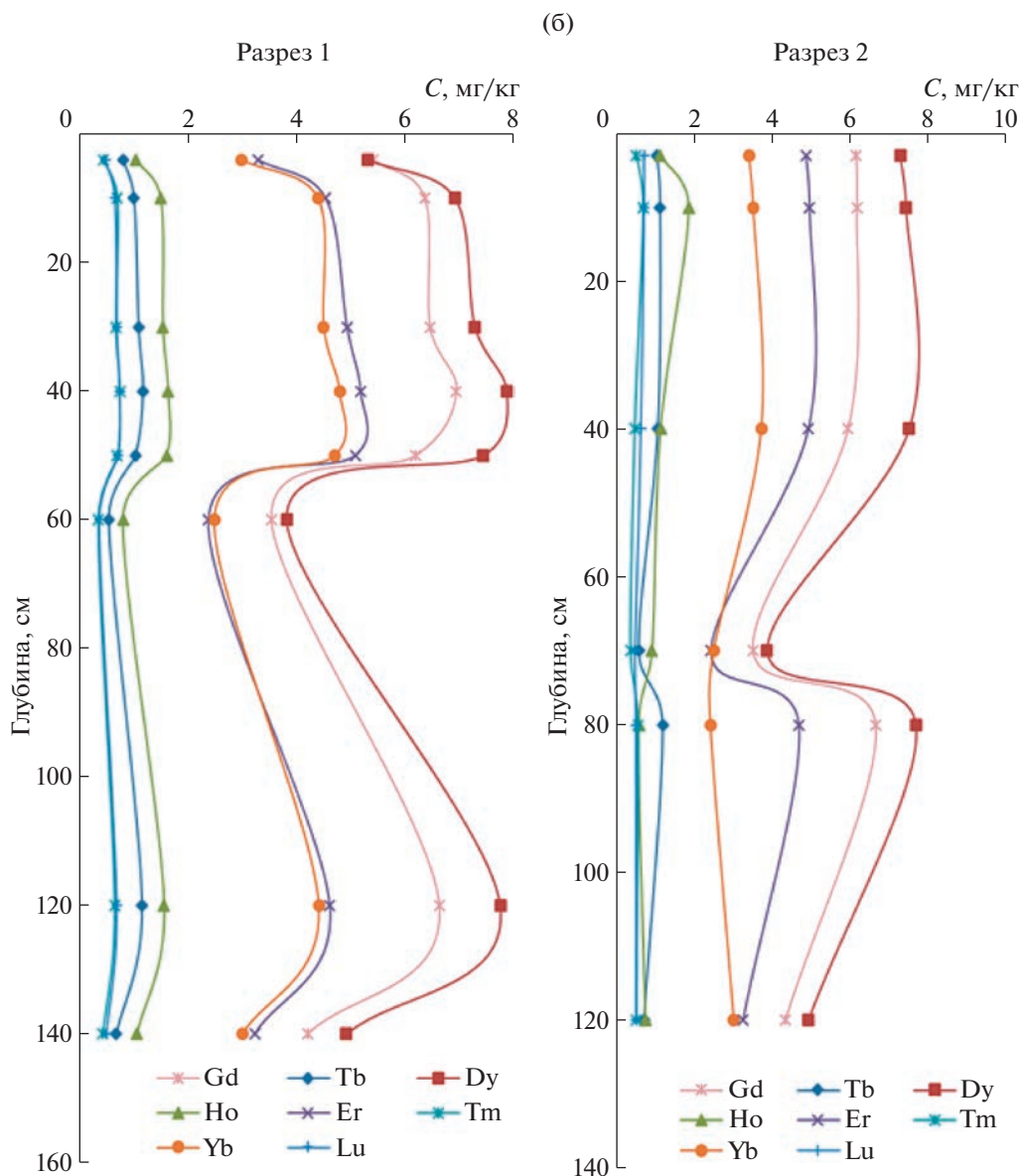


Рис. 3. Окончание.

Даже по сравнению с тяжелыми редкоземельными элементами содержание церия было больше в десятки раз.

Содержание самария в исследованной почве составило от 3.0 до 5.7 мг/кг, максимальный уровень накопления самария соответствовал верхнему горизонту А, что было связано с содержанием органического вещества и постепенным вымыванием самария в нижние горизонты В1 и В2.

Содержания тяжелых редкоземельных элементов по профилю разрезов были распределены равномерно, и их максимальное содержание обнаружено в горизонтах А или В на глубине 50–80 см.

Автор благодарит сотрудников Института геохимии СО РАН А.Ю. Митрофанову, Н.Н. Пахомову и В.И. Гребенщикову за поддержку и помощь в отборе образцов и проведении анализа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас Иркутской области: экологические условия. Иркутск, 2004. 90 с.
2. Балашов Ю.А. Геохимия редкоземельных элементов. М.: Наука, 1976. 267 с.
3. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. Пер. с англ. / Под ред. Саета Ю.Е. М.: Мир, 1989. 439 с.

4. Кузьмин В.А. Почвы Предбайкалья и Северного Забайкалья. Новосибирск: СО АН СССР, Наука, 1988. 174 с.
5. Напрасникова Е.В. Экологическое состояние почвенного покрова юго-западного побережья оз. Байкал // Сиб. мед. журн. 2008. № 2. С. 69–71.
6. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов. Кн. 1–6. М.: Недра–Экология, 1994–1997.
7. Кожевникова Н.М. Распределение редкоземельных элементов цериевой подгруппы (La, Ce, Pr, Nd, Sm) в профиле аллювиальной луговой почвы Забайкалья и их аккумуляция растениями овса на примере лантана // Агрохимия. 2012. № 10. С. 32–38.
8. МВИ 002-ХМС-2009 “Методика выполнения измерений массовых долей 62 элементов в почвах, донных отложениях, горных породах и сплавах цветных металлов методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой”. 2015.
9. Микроэлементы в почвах Советского Союза. М., 1973. Вып. 1. 280 с.
10. Переломов Л.В. Взаимодействие редкоземельных элементов с биотическими и абиотическими компонентами почв // Агрохимия. 2007. № 11. С. 85–96.
11. Fedotov P.S., Rogova O.B., Dzhenloda R.Kh., Karandashchev V.K. Metal-organic complexes as a major sink for rare earth elements in soils // Environ. Chem. 2019. V. 16. № 5. P. 323–332.
12. Ran Y., Liu Z. The distribution of REEs in Chinese major types of soil // Acta Chin. Rare Earth Element. 1994. № 12 (4). P. 243–252.
13. Sahoo S.K., Yonehara H., Kurotari K., Shiraishi K., Ramzaev V., Barkovski A. Determination of rare earth elements, thorium and uranium by Inductively coupled plasma mass spectrometry and strontium isotopes by thermal ionization mass spectrometry in soil samples of Bryansk region contaminated due to Chernobyl accident // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2004. V. 247. № 2. P. 341–345.
14. Taylor S.R., McLennan S.M. The continental crust: its composition and evolution. Oxford, Melbourne: Blackwell Scientific Publications, 1985. 312 p.
15. Переломов Л.В., Асаинова Ж.С., Йошида С., Иванов И.В. Содержание редкоземельных элементов в почвах Приокско-террасного биосферного заповедника // Почвоведение. 2012. № 10. С. 1115–1126.
16. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Изд-во МГУ, 1999. 610 с.
17. Tyler G., Olsson T. Conditions related to solubility of rare and minor elements in forest soils // J. Plant. Nutr. Soil Sci. 2002. V 165. P. 594–601.

Distribution of Rare-Earth Elements in the Profile of Alluvial Meadow Soil in Kurkuty Bay oz. Baikal

O. V. Zarubina

*A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS
ul. Favorskogo 1a, Irkutsk 664033, Russia
E-mail: zarub@igc.irk.ru*

The results presented of the content of rare-earth elements in the profile of the alluvial meadow soil of the Kurkuty bay of the lake Baikal. The maximum content for light rare earth elements was revealed in the upper Ap horizon. The content of heavy rare earth elements along the profile of the sections distributes evenly and reaches its maximum value mainly in horizons A and B.

Key words: alluvial meadow soil, rare earth elements (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, and Lu), inductively coupled plasma mass spectrometry.