

**ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПОЧВАХ
ЮЖНОЙ ТАЙГИ ВЕРХНЕГО ПРИАМУРЬЯ, СФОРМИРОВАННЫХ НА ГОРНЫХ ПОРОДАХ
РАЗЛИЧНОГО СОСТАВА**

С.В. Брянин, О.А. Сорокина

*ФГБУН Институт геологии и природопользования ДВО РАН, Речной 1, г. Благовещенск, 675000;
e-mail: bruanin@gmail.com*

Поступила в редакцию 6 марта 2014 г.

Исследованы структурно-метаморфические почвы (буроземы грубогумусовые), сформированные на различных горных породах в естественных условиях южной тайги (бассейн р. Селемджа, Верхнее Приамурье). Впервые в профиле буроземных почв с использованием современных методик (ICP-MS) определены концентрации редкоземельных элементов (РЗЭ). Максимальные концентрации РЗЭ отмечаются в коренных породах, а суммарное содержание РЗЭ в системе горная порода–почва постепенно уменьшается снизу-вверх. Процессы почвообразования не оказывают существенного влияния на характер распределения РЗЭ в почвенном профиле, а влияют только на уровни их концентраций. Распределение РЗЭ во всех горизонтах почв характеризуется обогащением легкими лантаноидами и истощением тяжелыми. Большинство спектров РЗЭ в изученных почвах имеют незначительную отрицательную европиевую аномалию – $Eu/Eu^* = 1.07-0.63$, при этом цериевой аномалии не выявлено, $Ce/Ce^* = 1$.

Ключевые слова: редкоземельные элементы, генетические горизонты почв, горные породы, Верхнее Приамурье.

ВВЕДЕНИЕ

Вопросам поведения редкоземельных элементов (РЗЭ) в процессе почвообразования и выветривания горных пород уделяется большое внимание, особенно в зарубежной литературе [29, 30, 42]. Так в лесных подзолах Швеции обнаружено заметное истощение РЗЭ осветленного горизонта (Е) на фоне более высоких концентраций в выше- и нижележащих горизонтах почвенного профиля [41]. Данный факт подтверждает активное вовлечение РЗЭ в процессы элювирования химических элементов. В лесных почвах Китая, сформированных на продуктах выветривания гранитов, происходит иная дифференциация профиля – максимальное содержание РЗЭ отмечено в метаморфическом (срединном) горизонте почвенного профиля, при этом в вышележащем органогенном горизонте и горной породе концентрации РЗЭ заметно ниже [47]. Значительное влияние почвообразовательных процессов на вертикальное распределение РЗЭ в почвах южных равнин Китая отмечено в работах [26, 32, 33, 36].

В России подобные исследования проводятся более ограниченно, в основном в европейской части страны [6, 14], некоторые из них характеризуют неполный спектр элементов группы РЗЭ [7–9, 15]. На

территории Дальнего Востока вопросы содержания и распределения РЗЭ в почвах рассматриваются только в рамках геохимических исследований речных долин. Особенности накопления и фракционирования РЗЭ в речных взвесах, поверхностных водах и атмосферных осадках наиболее полно раскрыты в работах В.А. Чудаевой, О.В. Чудаева с соавторами [23, 24, 27, 28], Е.А. Вах с соавторами [2–4]. В работах [19, 20, 21] охарактеризован химический состав аллювиальных почв и донных отложений крупных рек Приамурья (Амур, Зeya, Селемджа, Уркан).

Свойства и химический состав почв во многом зависят от состава горных пород, на которых они развиваются. Процессы почвообразования приводят к аккумуляции одних элементов и рассеиванию других. При этом концентрации элементов внутри профиля почвы могут изменяться в значительных пределах и сильно отличаться от их содержания в коренной породе. Присутствие РЗЭ в составе горных пород объясняет их нахождение в почвах, где они высвобождаются в ходе химического разрушения первичных минералов и аккумулируются в продуктах выветривания, вовлекаются в процессы почвообразования и вертикального перераспределения элементов. Между тем влияние

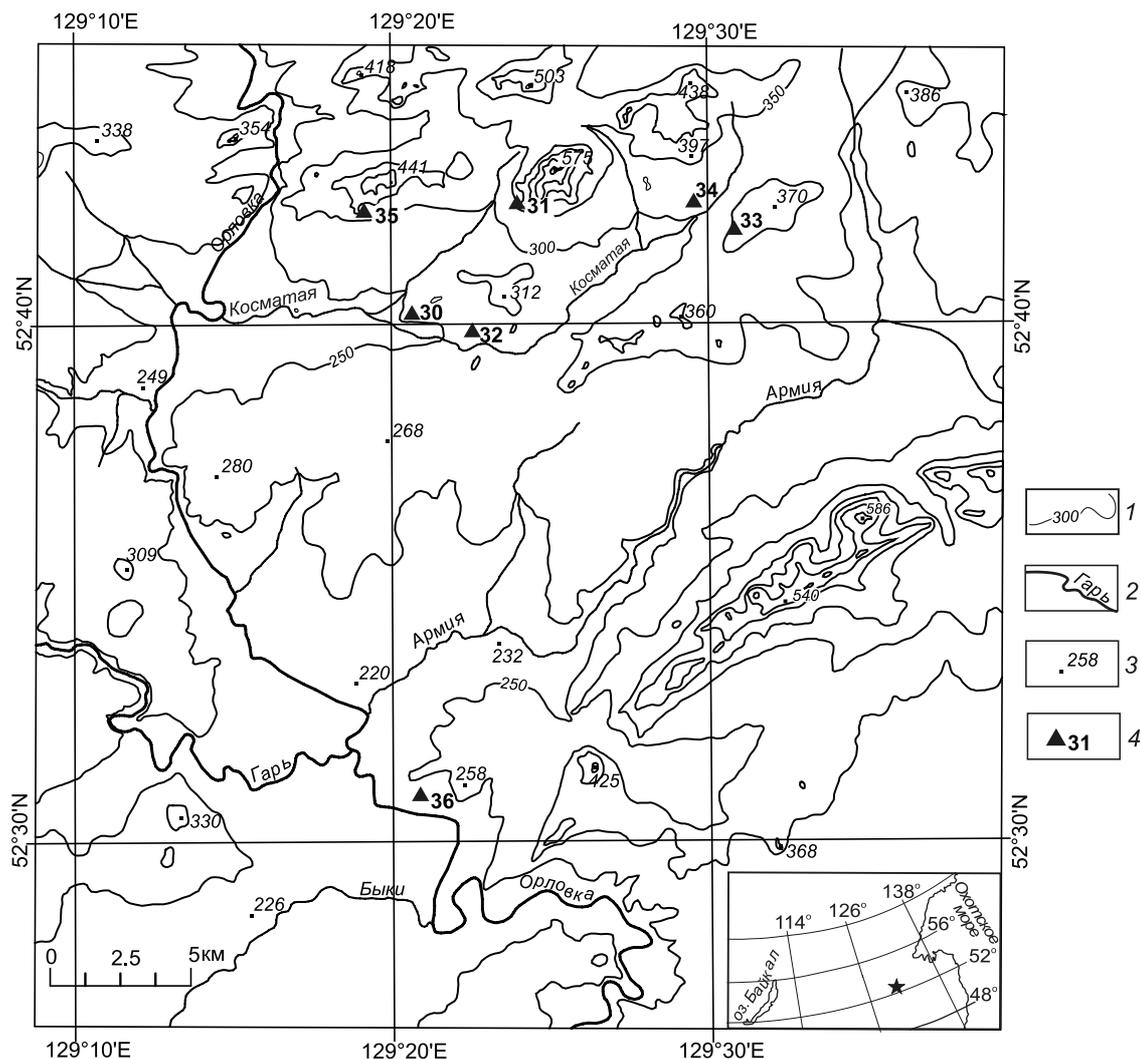


Рис. 1. Схема района исследований.

1 – горизонтали рельефа с отметками высот, 2 – водотоки, 3 – абсолютные отметки высот, 4 – расположение и номер почвенного разреза.

процессов почвообразования на внутрипрофильное распределение РЗЭ в почвах гумидных областей России остается неизученным.

Цель данной статьи – выявить закономерности вертикального распределения РЗЭ в зональных автоморфных буроземах, формирующихся в естественных условиях на продуктах выветривания различных горных пород на примере почв бассейна реки Орловка (приток р. Селемджа, бассейн р. Зея).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Район исследований охватывает междуречье Зеи и Селемджи – одних из наиболее крупных рек бассейна р. Амур. Территория исследований представляет собой типичный ландшафт Приамурья, который характеризуется низкогорным рельефом с сопочными

массивами и обширными межсопочными понижениями (рис. 1). Межсопочные котловины представляют собой чашеобразные депрессии с плоским дном, заполненные аккумулятивным или денудационным материалом, мощность которого достигает 25–30 м. Абсолютные высоты сопочных массивов колеблются от 450 до 700 м, высота дна межсопочных котловин – от 300 до 400 м. Склоны сопочных массивов в верхней части крутые (20–35°), а внизу выполаживаются до 15–20°, на границе с денудационным дном котловин наблюдается четкий перегиб – шов [10].

В схемах тектонического районирования рассматриваемая территория относится к Мамыньскому террейну [13]. По существующим представлениям [11], в строении фундамента этого террейна выделяются ранне- и позднекембрийские метаморфические

комплексы, которые перекрыты нижнекембрийскими известняками, алевролитами, аргиллитами, силурийскими мелководно-морскими терригенными отложениями, ниже-среднедевонскими терригенно-карбонатными комплексами. Значительная часть Мамынского террейна сложена гранитоидными интрузиями, индексируемыми в возрастном интервале от раннего докембрия до раннего мезозоя [11]. Они скудно охарактеризованы современными геохронологическими данными, исключение составляют лишь единичные датировки, характеризующие палеозойские и ранне-мезозойские комплексы [16, 18].

К наиболее молодым образованиям относятся верхнетриасовые и юрские морские и континентальные терригенные отложения Зея-Депского прогиба, поздне-мезозойские интрузивные и вулканические комплексы Умлекано-Огоджинского пояса [11, 17]. Наконец, самыми молодыми перекрывающимися образованиями являются кайнозойские рыхлые отложения Амура-Зейской впадины.

Климат территории континентальный с муссонными чертами [5]. Для нее характерно влажное, жаркое лето и суровая малоснежная зима. Среднегодовая сумма осадков (по метеостанции Нора) 630 мм, из них 89 % выпадает в период с апреля по октябрь, среднегодовая температура -5.4°C , при этом средняя температура января -33.5°C , июля $+18.0^{\circ}\text{C}$, продолжительность безморозного периода 78 дней.

На исследуемой территории распространены типичные южнотаежные лиственничные и лиственнично-березовые леса. Континентальность климата определяет доминирование бореальных видов в составе растительного покрова территории, но в то же время растительность имеет черты неморальности, связанные с влиянием летнего муссона [22]. Совокупность этих природных факторов создает условия для формирования грубогумусовых почв буроземного ряда.

Полевые работы проводились в июле-августе 2012 г. в долине рек Косматая и Орловка (бассейн р. Селемджи) (рис. 1).

Образцы почв отобраны из почвенных разрезов, заложенных на южных склонах под лесной растительностью. В пределах почвенных профилей выделены генетические горизонты. Названия почвам даны согласно классификации почв России [12]. Из каждого горизонта отбирался образец массой около 1 кг, кроме того в месте заложения разреза отбирались образцы горных пород.

Образцы почв высушивались, измельчались, тщательно перемешивались, затем подвергались истиранию до крупности 200 меш. Определение РЗЭ выполнено в Хабаровском инновационно-аналити-

ческом центре Института тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН методом индуктивной плазменной масс-спектрометрии (ICP-MS), измерения проведены на приборе Elan DRC II PerkinElmer (США), аналитики Авдеев Д.В., Боковенко Л.С. Ошибка измерения составляла не более 5 % RSD.

Определение РЗЭ было выполнено в гумусово-аккумулятивном (АУ), метаморфическом (ВМ) горизонтах почвы и в ненарушенной процессами выветривания горной почвообразующей породе (С).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследуемые буроземы – грубогумусовые, по классификации [12] относятся к отделу структурно-метаморфических почв (постлитогенные почвы), характеризующихся наличием грубогумусового горизонта мощностью 8–10 см. Однако в изученных нами почвах поверхностный грубогумусовый горизонт отличается малой мощностью (2–4 см), что не вполне соответствует приведенной выше характеристике. Малая мощность поверхностного горизонта обусловлена частыми низовыми пожарами, которые препятствуют его полноценному формированию. Данная особенность характерна для большинства буроземных почв Приамурья и была отмечена в предыдущих работах авторов [1]. Грубогумусовый горизонт АО сменяется гумусово-аккумулятивным горизонтом АУ, мощностью 5–8 см, с высоким содержанием органического вещества. Под ним залегает минеральная метаморфическая толща бурого или красновато-бурого цвета, мощностью 20–30 см, в пределах которой выделяются горизонты ВМ1 и ВМ2.

По морфологическому строению изученные почвы схожи, в них выделяется однотипный набор генетических горизонтов, профили почв маломощные (до 65 см) с большим количеством обломочного материала. Ниже приведено морфологическое описание типичного разреза бурозема грубогумусового.

Разрез № 32. 26 июля 2012 г. Долина р. Косматой.

Рельеф: верхняя часть склона юго-западной экспозиции, абсолютная высота 271 м, уклон 4° .

Растительность: березово-лиственничный рододендроновый лес.

АО	0–3 см	Темно-серый, до черного, обилие средних и слабо разложившихся растительных остатков, углей ($d = 1–3$ мм), рыхлый, сухой; переход резкий, ровный.
АУ	3–8 см	Темно-серый, комковато-мелкозернистый, легкосуглинистый, рыхлый, влажный, пронизан корнями; переход ровный, ясный.

BM1	8–19 см	Бурый, комковато-зернистый, средне-суглинистый, рыхлый, влажный, обилие мелких корней, включения дресвы, гравия (14 %*); переход постепенный.
BM2	19–29 см	Светло-бурый, непрочно комковато-зернистый, среднесуглинистый, редко мелкие корни, обильные включения дресвы (64 %); переход ясный.
BMC	29–57 см	Светло-бурый, бесструктурный, представлен фрагментарно, между обломками горной породы, легкосуглинистый, в мелкоземе обилие гравия, щебня (82 %).
C	ниже 57 см	Слабо измененная процессами почвообразования горная порода: гранит лейкократовый.

* Процент содержания в почве обломочного материала (по массе).

Строение профилей почв, исследованных в данной работе, и условия их формирования приведены в табл. 1.

Суммарное содержание РЗЭ в коренных породах изучаемой территории колеблется в широких пределах (75–425 мкг/г) (табл. 2). Наиболее обогащены РЗЭ риолиты – 296–425 мкг/г, меньшими содержаниями характеризуются габбро, габбродиориты и песчаники – 94–159 мкг/г, а самое низкое суммарное содержание РЗЭ отмечено в гранитах – 75–78 мкг/г. В недавних исследованиях на юге Китая отмечена обратная тенденция: среди изученных горных пород граниты располагались на первом месте по суммарному содержанию РЗЭ (249 мкг/г) [34]. Относительно высокая обогащенность РЗЭ гранитов по сравнению с другими породами была также подтверждена L. Minarik с соавторами [37] при исследовании поведения РЗЭ в процессе выветривания горных пород.

Концентрации РЗЭ в отдельных горизонтах почвы позволяют установить особенности их миграции в ходе процесса почвообразования.

Распределение РЗЭ в проанализированных образцах почв, развитых на гранитах, риолитах и известковых песчаниках отчетливо дифференцировано (рис. 2), при этом отношение $[La/Yb]_n$ варьирует в широком диапазоне от 7.3 до 25.6. Графики, отражающие особенности почв, развитых на габбро, более пологие, значения отношения $[La/Yb]_n = 4.3–7.9$. Подобные значения отношения $[La/Yb]_n \sim 6–8$ обычно характеризуют породы основного состава, для которых присущ относительно пологий график распределения РЗЭ.

Характерной чертой распределения РЗЭ является обогащение легкими лантаноидами по отношению к средним. Отношение $[La/Sm]_n$, характеризующее крутизну наклона левой ветви спектров РЗЭ, составляет от 2.1 до 5.6. Сравнивая средние значения параметра $[La/Sm]_n$, заметим, что наименьшие из них относятся к почвам, развитым на габбро и габбродиоритах ($[La/Sm]_n = 2.1–2.9$).

В области средних и тяжелых лантаноидов графики для песчаников, габбро и габбродиоритов пологие, для них характерны значения $[Gd/Yb]_n = 1.4–2.3$. Почвы, развитые на гранитах и риолитах, характеризуются значениями $[Gd/Yb]_n > 2$, что указывает на заметное деплетирование почв тяжелыми лантаноидами.

На графиках (рис. 2), характеризующих распределение лантаноидов в изученных почвах, большинство спектров РЗЭ имеют незначительную отрицательную европиевую аномалию – $Eu/Eu^* = 1.07–0.63$. Однако европиевая аномалия, выраженная в известковистых песчаниках, в горизонтах почв практически отсутствует. Аномальное распределение церия практически отсутствует во всех проанализированных образцах, $Ce/Ce^* = 1.1$.

Рассматривая изменение суммарного содержания РЗЭ в отдельных горизонтах почвенного профиля, отметим, что в гумусово-аккумулятивных горизонтах вариации значений невелики (117–85 мкг/г).

Таблица 1. Условия формирования и строение буроземов грубогумусовых.

Номер разреза	Географические координаты	Абс. высота, м	Коренная порода	Уклон поверхности (в градусах), экспозиция	Горизонты и их глубина, см				
					АО	АУ	BM1	BM2	BMC
30	N 52°40'07", E 129°20'30"	282	Гранит	10, Ю	0–3	3–8	8–21	21–31	31–44
31	N 52°42'21", E 129°23'57"	331	Риолит	9, ЮЗ	0–4	4–9	9–18	–	18–35
32	N 52°39'44", E 129°22'25"	271	Гранит	4, ЮЗ	0–3	3–8	8–19	19–28	29–57
33	N 52°42'12", E 129°30'60"	342	Риолит	7, З	0–4	4–8	8–17	–	17–33
34	N 52°42'22", E 129°29'31"	315	Известковистый песчаник	4, ЮВ	0–3	3–8	8–20	20–42	42–59
35	N 52°42'12", E 129°19'07"	324	Габбро	5, Ю	0–2	2–6	6–16	16–33	33–42
36	N 52°30'45", E 129°20'56"	223	Габбро	4, Ю	0–2	2–9	9–24	24–38	38–65

Таблица 2. Содержание редкоземельных элементов в горизонтах грубогумусовых буроземов и горных породах (С*), мг/кг.

№ разреза	30			32			31			33		
горная порода	Гранит			Гранит			Риолит			Риолит		
горизонт	АО	ВМ	С*	АО	ВМ	С*	АО	ВМ	С*	АО	ВМ	С*
La	18.82	17.23	16.73	25.43	15.93	32.87	24.91	76.85	97.58	19.77	23.04	61.26
Ce	39.21	41.45	32.41	51.83	38.11	60.24	53.72	119.11	188.68	35.99	45.35	144.43
Pr	3.92	3.59	3.56	5.22	3.50	6.06	4.75	15.76	18.71	3.59	4.71	12.51
Nd	15.26	13.56	12.89	19.98	13.06	20.85	18.41	59.86	64.53	13.24	17.61	43.63
Sm	2.87	2.54	2.24	3.72	2.31	3.66	3.27	10.09	12.24	2.22	3.13	6.88
Eu	0.71	0.75	0.71	0.89	0.57	0.82	0.69	1.66	1.91	0.52	0.76	0.95
Gd	3.06	2.87	2.22	3.90	2.27	3.78	3.47	9.73	13.06	2.31	3.12	7.44
Tb	0.37	0.33	0.26	0.45	0.24	0.49	0.38	1.02	1.84	0.26	0.36	1.05
Dy	2.06	1.87	1.35	2.41	1.25	2.71	2.04	4.82	10.54	1.38	1.97	6.20
Ho	0.37	0.34	0.27	0.42	0.22	0.55	0.35	0.79	2.14	0.25	0.35	1.37
Er	1.11	1.05	0.82	1.29	0.71	1.63	1.08	2.43	6.26	0.78	1.06	4.34
Tm	0.14	0.14	0.12	0.17	0.10	0.24	0.14	0.30	0.90	0.10	0.14	0.66
Yb	0.99	0.97	0.85	1.12	0.67	1.63	0.93	2.04	5.90	0.69	0.96	4.54
Lu	0.14	0.14	0.13	0.16	0.10	0.25	0.13	0.28	0.88	0.10	0.13	0.71
ΣREE	89.03	86.81	74.57	117.01	79.03	135.80	114.28	304.76	425.18	81.19	102.70	295.97
ΣLREE	80.79	79.12	68.54	107.07	73.48	124.50	105.75	283.33	383.65	75.33	94.60	269.66
ΣHREE	8.24	7.69	6.03	9.94	5.55	11.30	8.53	21.43	41.53	5.86	8.10	26.31
ΣLREE/ΣHREE	9.80	10.29	11.37	10.77	13.24	11.02	12.40	13.22	9.24	12.85	11.68	10.25
La _n /Yb _n	12.91	12.07	13.37	15.42	16.15	13.70	18.20	25.59	11.24	19.46	16.30	9.17
La _n /Sm _n	4.10	4.23	4.39	4.26	4.31	6.12	4.75	4.76	4.97	5.56	4.60	5.56
Gd _n /Yb _n	2.50	2.40	2.10	2.81	2.73	1.95	3.03	3.85	1.80	2.70	2.64	1.33
Eu/Eu*	1.07	0.91	0.82	0.70	0.75	0.96	1.60	1.98	2.18	0.69	0.73	0.40
Ce/Ce*	0.95	0.82	1.01	1.03	1.18	0.93	0.89	1.27	1.00	0.96	1.00	1.20

№ разреза	35			36			34		
горная порода	Габбродиорит			Габбро			Известковистый песчаник		
горизонт	АО	ВМ	С*	АО	ВМ	С*	АО	ВМ	С*
La	18.98	22.13	14.32	19.13	21.15	22.35	16.16	21.23	34.57
Ce	46.58	52.87	33.22	45.4	49.61	48.84	42.01	64.47	63.64
Pr	4.91	5.85	4.30	4.97	5.65	5.63	3.35	4.08	6.92
Nd	20.13	25.55	19.85	20.34	23.33	23.26	12.56	14.74	27.09
Sm	4.24	5.65	4.69	4.18	4.86	4.79	2.42	2.73	5.40
Eu	1.22	1.62	1.46	1.00	1.15	1.29	0.70	0.89	1.13
Gd	4.73	5.95	5.32	4.53	5.38	5.42	2.73	3.47	6.28
Tb	0.58	0.77	0.72	0.57	0.69	0.72	0.33	0.43	0.86
Dy	3.40	4.53	4.32	3.43	4.11	4.31	1.93	2.78	5.03
Ho	0.62	0.84	0.86	0.64	0.8	0.87	0.37	0.56	1.08
Er	1.89	2.51	2.49	2.04	2.53	2.61	1.18	1.86	3.26
Tm	0.24	0.33	0.34	0.28	0.34	0.37	0.16	0.27	0.48
Yb	1.64	2.17	2.24	1.92	2.4	2.51	1.11	1.86	3.23
Lu	0.22	0.31	0.34	0.28	0.34	0.38	0.16	0.28	0.51
ΣREE	109.4	131.09	94.45	108.72	122.35	123.34	85.18	119.66	159.46
ΣLREE	96.06	113.67	77.84	95.02	105.75	106.16	77.20	108.14	138.75
ΣHREE	13.34	17.42	16.61	13.7	16.6	17.18	7.98	11.52	20.71
ΣLREE/ΣHREE	7.20	6.53	4.69	6.94	6.37	6.18	9.67	9.39	6.70
La _n /Yb _n	7.86	6.93	4.34	6.77	5.99	6.05	9.89	7.75	7.27
La _n /Sm _n	2.79	2.44	2.01	2.86	2.72	2.9	4.17	4.85	3.67
Gd _n /Yb _n	2.34	2.21	1.91	1.90	1.81	1.96	2.00	1.50	1.41
Eu/Eu*	0.82	0.84	0.88	0.70	0.68	0.74	0.83	0.87	0.63
Ce/Ce*	1.14	1.10	1.00	1.10	1.08	1.03	1.31	1.56	0.95

Примечание. С* – содержание РЗЭ в горной породе (данные А.А. Сорокина), не затронутой процессами выветривания и почвообразования; ΣLREE – сумма легких РЗЭ (от La до Eu); ΣHREE – сумма тяжелых РЗЭ (от Gd до Lu); ΣREE – сумма концентраций всех РЗЭ. Определение содержаний основных компонентов в водных пробах выполнено методом ICP-MS (ElanDRCIIPerkinElmer) в Хабаровском инновационно-аналитическом центре ИТиГ ДВО РАН (аналитики Авдеев Д.В., Боковенко Л.С.).

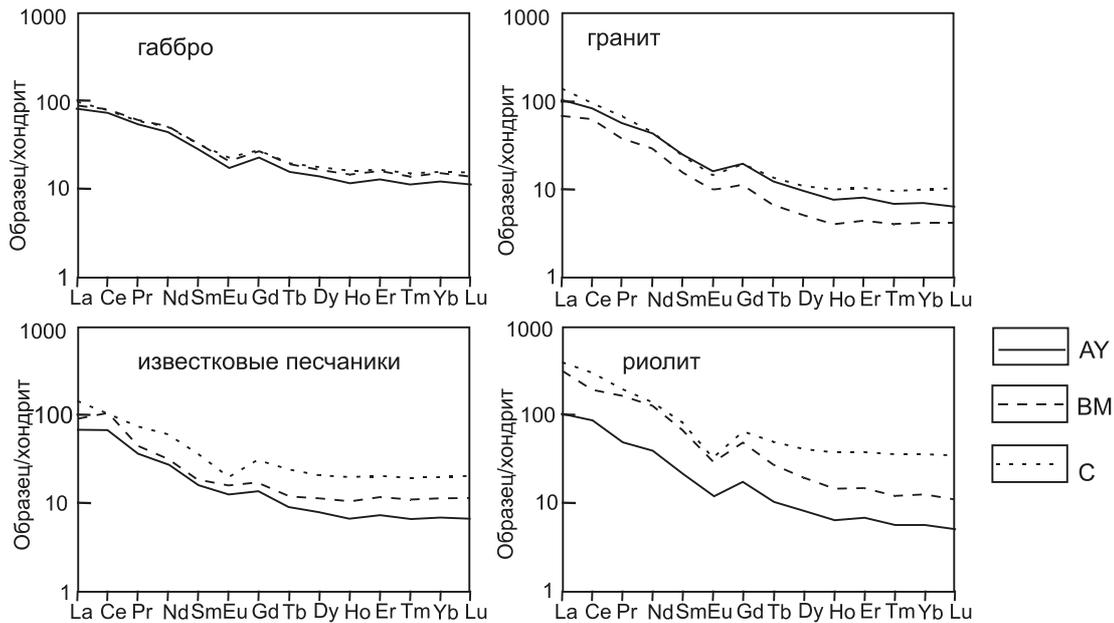


Рис. 2. Концентрации РЗЭ в генетических горизонтах изученных почв и горных породах, нормированные к среднему составу хондрита по [35].

АУ – гумусово-аккумулятивный горизонт, ВМ – метаморфический горизонт, С – почвообразующая (горная) порода.

Относительно низкое содержание РЗЭ в поверхностных горизонтах АУ, скорее всего, связано с присутствием большого количества органических кислот. Эти кислоты образуются на первых этапах гумусообразования при разложении растительных остатков и имеют рН от 2 до 3 [39], что существенно меняет окислительно-восстановительные условия почв. Кроме того, органическое вещество почв обладает высокой дисперсностью и способно связывать свободные РЗЭ и транспортировать их вниз по профилю. Еще одним возможным объяснением является то, что растения не слишком активно поглощают РЗЭ из почвы [30, 40], поэтому и в растительных остатках, формирующих впоследствии органогенные горизонты, содержание лантаноидов низкое.

Суммарное содержание РЗЭ в горизонте ВМ выше (от 79 до 305 мкг/г), чем в поверхностном горизонте АУ, и находится в прямой зависимости ($r^2 = 0.65$, $p = 0.05$) от содержания РЗЭ в горной породе. Повышенное относительное содержание РЗЭ в метаморфических горизонтах буротаежных грубогумусовых почв может являться результатом двух взаимосвязанных процессов. Горизонт ВМ в почвах буроземного ряда располагается в средней части профиля, где процессы внутрипочвенного выветривания первичных минералов протекают наиболее интенсивно. Кроме того, склоновые процессы обуславливают поступление нового обломочного материала, образованного при выветривании горных пород. Вторичные

глинистые минералы, формирующиеся в горизонте ВМ, по мнению многих авторов, являются основным концентратором РЗЭ в почвах [25, 32]. Гумусообразование в поверхностном слое сопровождается синтезом разнообразных органических кислот, следовательно, смещением реакции среды в кислую сторону. В этих условиях РЗЭ переходят в почвенный раствор и перемещаются вниз по профилю, накапливаясь в горизонте ВМ. Аналогичная особенность накопления РЗЭ была отмечена при изучении поведения РЗЭ в лесных почвах Германии [31], максимальное суммарное содержание лантаноидов отмечено в метаморфических горизонтах почв.

В целом, выявленный нами характер распределения РЗЭ в зональных буроземах Приамурья соответствует таковому в почвах холодных и умеренных гумидных областей с промывным типом водного режима, который был отмечен в Швеции, на Севере Германии и в Норвегии [31, 38, 42]. Однако связано ли это с переходом элементов в подвижные формы и их переносом в нижние горизонты профиля, либо это результат накопления РЗЭ в срединных метаморфических горизонтах в продуктах внутрипочвенного выветривания предстоит выяснить в ходе дальнейших исследований.

ВЫВОДЫ

Впервые исследовано содержание и распределение РЗЭ в структурно-метаморфических почвах (бу-

розе́мы грубогумусовые), сформированных на различных горных породах в естественных условиях южной тайги (бассейн р. Селемджи, Верхнее Приамурье).

При внешнем сходстве и принадлежности к одному подтипу, сформированные в аналогичных ландшафтных условиях буротаежные грубогумусовые почвы существенно различаются по уровню концентраций РЗЭ. Содержание РЗЭ в почвах зависит от их концентрации в породах ($r^2 = 0.65$, $p = 0.05$).

Во всех изученных системах почва–горная порода (кроме гранитов) наблюдается постепенное увеличение суммарного содержания РЗЭ сверху вниз от гумусово-аккумулятивных и метаморфических горизонтов к почвообразующей коренной породе.

Полученные результаты позволяют предположить, что процессы почвообразования в зоне тайги Верхнего Приамурья не влияют на характер распределения отдельных элементов группы лантаноидов в исследованных почвенных горизонтах, а влияют только на уровни их суммарных концентраций.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты: 14-05-31297 мол_а; 14-05-31052 мол_а; 15-05-03813-а).

Авторы выражают искреннюю благодарность и признательность А.А. Сорокину и рецензентам за ценные советы и конструктивные замечания при работе над рукописью публикации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Брянин С.В., Прокопчук В.Ф., Козырь И.В. Формирование лесных подстилок в суббореальных лесах Верхнего Приамурья // Вестн. СВНЦ ДВО РАН. 2013. № 2. С. 100–107.
- Вах Е.А., Вах А.С., Харитоновна Н.А. Содержание редкоземельных элементов в водах зоны гипергенеза сульфидных руд Березитового месторождения (Верхнее Приамурье) // Тихоокеан. геология. 2013. Т. 32, № 1. С. 105–115.
- Вах Е.А., Харитоновна Н.А., Вах А.С. Основные закономерности поведения редкоземельных элементов в поверхностных водах Приморья // Вестн. ДВО РАН. 2013. № 2. С. 90–97.
- Вах Е.А., Харитоновна Н.А., Вах А.С. Поведение редкоземельных элементов при формировании углекислых гидрокарбонатных минеральных вод Приморья // Изв. вузов. Геология и разведка. 2013. № 4. С. 48–58.
- Витвицкий Г.Н. Климат // Природные условия и естественные ресурсы СССР. Южная часть Дальнего Востока. М.: Наука, 1969. С. 70–96.
- Водяницкий Ю.Н. Геохимическое фракционирование лантанидов в почвах и горных породах (обзор литературы) // Почвоведение. 2012. № 1. С. 69–81.
- Водяницкий Ю.Н., Косарева Н.В., Савичев А.Т. Содержание лантаноидов (Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm) и актинидов (Th, U) в почвах Хибинско-Ловозерской провинции // Бюл. почвенного института им. В.В. Докучаева. 2010. № 65. С. 75–86.
- Водяницкий Ю.Н., Горячкин С.В., Савичев А.Т. Распределение редкоземельных (Y, La, Ce) и других тяжелых металлов в профиле почв подзолистого ряда // Почвоведение. 2011. Т. 5, № 5. С. 546–555.
- Водяницкий Ю.Н. Лантаниды почвы и их влияние на растения // Агрохимия. 2012. № 4. С. 84–96.
- Воскресенский С.С., Костомаха В.А. Геоморфологическое строение и районирование // Геоморфология Амура-Зейской равнины и низкогорья Малого Хингана Ч.1 / Под ред. С.С. Воскресенского. М.: Изд-во МГУ, 1973. С. 133–171.
- Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России / Ред. А.И. Ханчук. Владивосток: Дальнаука, 2006. Кн. 1. 572 с.
- Классификация и диагностика почв России / Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова / Под ред. Г.В. Добровольского. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
- Парфенов Л.М., Берзин Н.А., Ханчук А.И., Бадарч Г., Беличенко В.Г., Булгатов А.Н., Дриль С.И., Кириллова Г.Л., Кузьмин М.И., Ноклеберг У., Прокопьев А.В., Тимофеев В.Ф., Томуртоого О., Янь Х. Модель формирования орогенных поясов Центральной и Северо-Восточной Азии // Тихоокеан. геология. 2003. Т. 22, № 6. С. 7–41.
- Переломов Л.В. и др. Содержание редкоземельных элементов в почвах Приокско-террасного биосферного заповедника // Почвоведение. 2012. № 10. С. 1115–1126.
- Самсонова О.А. Редкоземельные элементы в почвах ландшафтов Смоленско-Московской возвышенности // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. 2013. Т. 3. С. 73–79.
- Сорокин А.А., Кудряшов Н.М., Ли Цзинь. U-Pb геохронология гранитоидов октябрьского комплекса Мамынского террейна (Приамурье) // Тихоокеан. геология. 2004. Т. 23, № 5. С. 54–67.
- Сорокин А.А., Сорокин А.П., Пономарчук В.А., Травин А.В., Мельникова О.В. Позднемезозойский вулканизм восточной части Аргунского супертеррейна (Дальний Восток): $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ геохронологические и геохимические данные // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2009. Т. 17, № 6. С. 90–104.
- Сорокин А.А., Кудряшов Н.М. Венд-кембрийские риодациты Мамынского террейна восточной части Центрально-Азиатского складчатого пояса: первые геохронологические и геохимические данные // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). Вып. 11. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2013. С. 225–226.
- Сорокина О.А., Киселев В.И. Особенности химического состава почв долины реки Джалинды (Верхнее Приамурье) // Литосфера. 2008. № 6. Р. 94–102.
- Сорокина О.А., Зарубина Н.В. Химический состав донных отложений среднего течения р. Амур // Тихоокеан. геология. 2011. Т. 30, № 5. С. 105–113.
- Сорокина О.А., Гусев М.Н. Содержание редкоземельных элементов в пойменных почвах долины р. Зея (бассейн р. Амур) // Вестн. СВНЦ ДВО РАН. 2014. № 3. С. 36–40.
- Сочава В.Б. Ботанико-географические соотношения в бассейне Амура // Амурская тайга (Комплексные ботанические исследования). М., 1969. С. 5–15.
- Чудаева В.А., Чудаев О.В. Особенности накопления и фракционирования редкоземельных элементов в поверхностных водах Дальнего Востока в условиях

- природных и антропогенных аномалий // Геохимия. 2011. № 5. С. 523–549.
24. Чудаева В.А., Чудаев О.В. Особенности химического состава воды и взвесей рек Приморья (Дальний Восток России) // Тихоокеан. геология. 2011. Т. 30, № 2. С. 102–119.
 25. Braun J.-J., Pagel M., Herbillin A. et al. Mobilization and redistribution of REEs and thorium in a syenitic lateritic profile: A mass balance study // Geochim. Cosmochim. Acta. 1993. V. 57, N 18. P. 4419–4434.
 26. Cheng H., Hao F., Ouyang W. et al. Vertical distribution of rare earth elements in a wetland soil core from the Sanjiang Plain in China // J. Rare Earths. 2012. V. 30, N 7. P. 731–738.
 27. Chudaeva V.A., Chudaev O.V., Sugimori K., Matsuo M. K.A. Trace and rare earth elements in surface waters of Kuril Islands (Russia) // Geochim. Cosmochim. Acta. 2008. V. Goldschmid. P. 163.
 28. Chudaeva V.A., Chudaev O.V., Yurchenko S.G. Chemical composition of precipitation in the southern part of the Russian Far East // Water Resources. 2011. V. 35, N 1. P. 58–70.
 29. Henderson P. Rare earth element geochemistry // Developments in geochemistry. Elsevier, Amsterdam. 1984. V. 2. 510 p.
 30. Hu Z., Haneklaus S., Sparovek G. et al. Rare earth elements in soils // Communications in soil science and plant analysis. 2006. V. 37, N 9–10. P. 1381–1420.
 31. Loell M., Albrecht C., Felix-Henningsen P. Rare earth elements and relation between their potential bioavailability and soil properties, Nidda catchment (Central Germany) // Plant and Soil. 2011. V. 349, N 1–2. P. 303–317.
 32. Ma J.-L., Wei G.-J., Xu Y.-G. et al. Mobilization and re-distribution of major and trace elements during extreme weathering of basalt in Hainan Island, South China // Geochim. Cosmochim. Acta. 2007. V. 71, N 13. P. 3223–3237.
 33. Mao L., Mo D., Li M. et al. The rare earth element compositions of sediments from the loess tableland in the Liyang Plain, southern China: implications for provenance and weathering intensity // Environ. Earth Sci. 2010. V. 62, N 8. P. 1609–1617.
 34. Markert B., De Li Z. Natural background concentrations of rare earth elements in a forest ecosystem // Sci. Total Environ. 1991. V. 103, N 1. P. 27–35.
 35. McDonough, Sun S.-s. The composition of the Earth // Chem. Geol. 1995. V. 120, N 3–4. P. 223–253.
 36. Miao L., Xu R., Ma Y. et al. Geochemistry and biogeochemistry of rare earth elements in a surface environment (soil and plant) in South China // Environmental Geol. 2008. V. 56, N 2. P. 225–235.
 37. Minarik L., Zigova A., Bendl J., Sktivan P., Stastny M. The behaviour of rare-earth elements and Y during the rock weathering and soil formation in the Ricany granite massif, Central Bohemia // Sci. Total Environment. 1998. N 215. P. 101–111.
 38. Mourier B., Poulenard J., Carcaillet C. et al. Soil evolution and subalpine ecosystem changes in the French Alps inferred from geochemical analysis of lacustrine sediments // J. Paleolimnology. 2010. V. 44, N 2. P. 571–587.
 39. Nagao S., Rao R.R., Killely R.W.D., Young J.L. Migration behaviour of Eu (III) in a sandy soil in the presence of dissolved organic materials // Radiochim. Acta. 1998. V. 82. P. 205–211.
 40. Nikonov V.V., Lukina N.V., Frontasyeva M.V. Trace elements in Al-Fe-humus podzolic soils subject to aerial pollution from the copper-nickel production industry in conditions of varying lithogenic background. // Eurasian Soil Sci. 1999. V. 32. P. 338–349.
 41. Tyler G. Vertical distribution of major, minor, and rare elements in a Haplic Podzol // Geoderma. 2004. V. 119, N 3–4. P. 277–290.
 42. Tyler G., Olsson T. Rare earth elements in forest-floor herbs as related to soil conditions and mineral nutrition // Biol. Trace Element Res. 2005. V. 106, N 2. P. 177–191.
 43. Zuoping Z., Chuanxian L. The behaviour of rare-earth elements (REE) during weathering of granites in southern Guangxi, China // Chinese J. Geochem. 1996. V. 15, N 4. P. 344–352.

Рекомендована к печати Б.А. Вороновым

S.V. Bryanin, O.A. Sorokina

Vertical distribution of rare earth elements in southern taiga soils of Upper Priamurye formed on the mountain rocks of various composition

Structural-metamorphic soils (brown coarse-humic taiga soils) formed on different mountain rocks of various composition were examined in natural southern taiga in basin of the Selemdzha River (Upper Priamurye). Rare earth elements (REE) concentrations were analyzed by using modern methods of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The results obtained show the maximal REE concentrations in the parent rocks and a total REE content in the system mountain rock – soil gradually decreases upward. It seems that soil formation processes soil make a greater impact on the REE concentrations rather than the pattern of their distribution in the soils. The distribution of rare earth elements throughout the soil levels is characterized by the enrichment in light rare earth elements. Chondrite-normalized REE patterns show a slight europium anomaly $-Eu/Eu^* - 1.07-0.63$, while cerium anomaly was not revealed, $Ce/Ce^* = 1$.

Key words: rare earth elements, soil horizons, mountain rocks, Upper Priamurye.