

---

---

**ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ  
И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

---

---

УДК 550.424

**ОСОБЕННОСТИ МИГРАЦИИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
В ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ  
НА ПРИМЕРЕ АЛБЫНСКОГО ЗОЛОТОРУДНОГО  
МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПРИАМУРЬЯ**

© 2017 г. В. И. Радомская\*, С. М. Радомский\*, Л. М. Павлова\*, Е. Н. Кулик\*\*

\*Институт геологии и природопользования ДВО РАН,  
пер. Релочный, 1, Благовещенск, 675000 Россия. E-mail: radomskaya@ascnet.ru

\*\*ОАО ГК «Петропавловск»,  
ул. Ленина, 140/1, Благовещенск, 675000 Россия. E-mail: elenk70@mail.ru

Поступила в редакцию 15.02.2016 г.

Изучены содержание и распределение редкоземельных элементов в почвах и надземной части растений в природных ландшафтах и на территории Албынского золоторудного месторождения. Выявлены основные минералы редкоземельных элементов (РЗЭ) золоторудного месторождения. Характерная черта распределения РЗЭ в почвах – их обогащение легкими лантаноидами по отношению к тяжелым. В техногенных почвах увеличивается содержание группы непрочно связанных соединений РЗЭ, наибольшие концентрации металлов зафиксированы во фракции, представленной специфически сорбированными формами. На Албынском месторождении проявляется влияние биологического барьера, препятствующего чрезмерному накоплению РЗЭ в растительности.

**Ключевые слова:** редкоземельные элементы, фракционный состав почв, растения, коэффициенты накопления, Албынское золоторудное месторождение.

## ВВЕДЕНИЕ

Редкоземельными элементами (РЗЭ) называют группу из 15 элементов от лантана до лютеция, достаточно широко распространенных в природе. Эту группу чаще всего делят на две подгруппы: легкие (La-Eu) и тяжелые (Gd-Lu). Содержание большинства редкоземельных элементов превосходит содержание Cd в верхней части континентальной коры, а концентрации La, Ce и Nd сопоставимы с содержанием хорошо изученных тяжелых металлов, таких как Zn, Cr, Cu, Pb. Металлы этой группы редко формируют рудные тела и концентрируются главным образом в акцессорных минералах. Известно более 60 собственных минералов РЗЭ, в которых они содержатся в количестве более 5%. К наиболее значимым минералам РЗЭ относятся фосфаты (монацит и ксенотим), карбонаты, флюоро-карбонаты (бастнезит) и флюоро-фосфаты [12].

Изучению уровней накопления и характера распределения РЗЭ в различных компонентах

природной среды в настоящее время уделяется большое внимание в связи с увеличением технофильности РЗЭ (технофильность – отношение ежегодной добычи элемента к его кларку в земной коре). Работа горнодобывающей промышленности по переработке минерального сырья многократно усиливает эрозионные процессы и приводит к увеличению техногенной миграции различных химических элементов, в том числе РЗЭ. Кроме того, РЗЭ находят применение в различных областях производства: ядерная энергетика, лазерные, магнитные и термоэлектрические материалы, электроника, медицинские препараты и приборы [2], в качестве удобрения в сельском хозяйстве, особенно Китая, а также в качестве химических реагентов при производстве катализаторов для автомобильных двигателей [17]. Вследствие этого все большее количество РЗЭ попадает в почву и водоемы. Формы нахождения элементов в почвах во многом определяют дальнейшие пути их миграции и накопления. Вопросы о состоянии РЗЭ в почвах и определении

совокупности потенциально подвижных элементов при возможных изменениях почвенно-экологических условий остаются дискуссионными.

В долговременной перспективе РЗЭ могут стать одним из новых факторов загрязнения окружающей среды [1]. Вышесказанное позволяет отметить, что в настоящее время для оценки содержания и динамики накопления РЗЭ в почвах и растительности требуется сбор данных, характеризующих региональные или локальные территории. Основная цель настоящей работы — определение содержаний и распределения РЗЭ в почве и растительности поля Албынского золоторудного месторождения Приамурья.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объекты исследования — верхние горизонты почвы (0–10 см) с мониторинговых площадок (рис. 1), расположенных по периметру карьера Албынского рудника на расстоянии 500–800 м (точки П1, П2, П3, П4); 1000–1300 м (точки П8, П9); 5 км (точка П10), а также на фоновой территории (точка П7) в 30 км от рудного поля. Пробы почво-

грунтов отобраны и с отвала пустой породы (точка П11), с бортов хвостохранилища (точки П5, П6) и у дороги (точка П12). Образцы растительности отбирали с мест отбора почв и грунтов. Корни растений удаляли непосредственно в момент отбора проб. Пробы почв и почвогрунтов массой 1 кг высушивали, просеивали через сито с диаметром 1 мм. Надземную часть растений промывали дистиллированной водой, высушивали и измельчали до мелкодисперсного состояния.

Пробы растительности с точек П1, П2, П3 представляли собой усредненные образцы укосов надземных частей следующих растений: спиреи дубравколистной (*Spiraea chamaedrifolia* L.), злаков (*Calamagrostis* sp.), лабазника дланевидного (*Filipendula palmata* (Pall.) Maxim.), василистника малого (*Thalictrum minus* L.), латука сибирского (*Lactuca sibirica* (L.) Benth. ex Maxim.). В точке П4 произрастали в основном клевер луговой (*Trifolium pratense* L.) и осока вздутоносая (*Carex rhynchophylla* C. A. Mey.), а около хвостохранилища — полынь веничная (*Artemisia scoparia* Waldst. et Kit.), иван-чай узколистый (*Chamerion angustifolium* (L.) Holub) и осока. Фоновая пло-

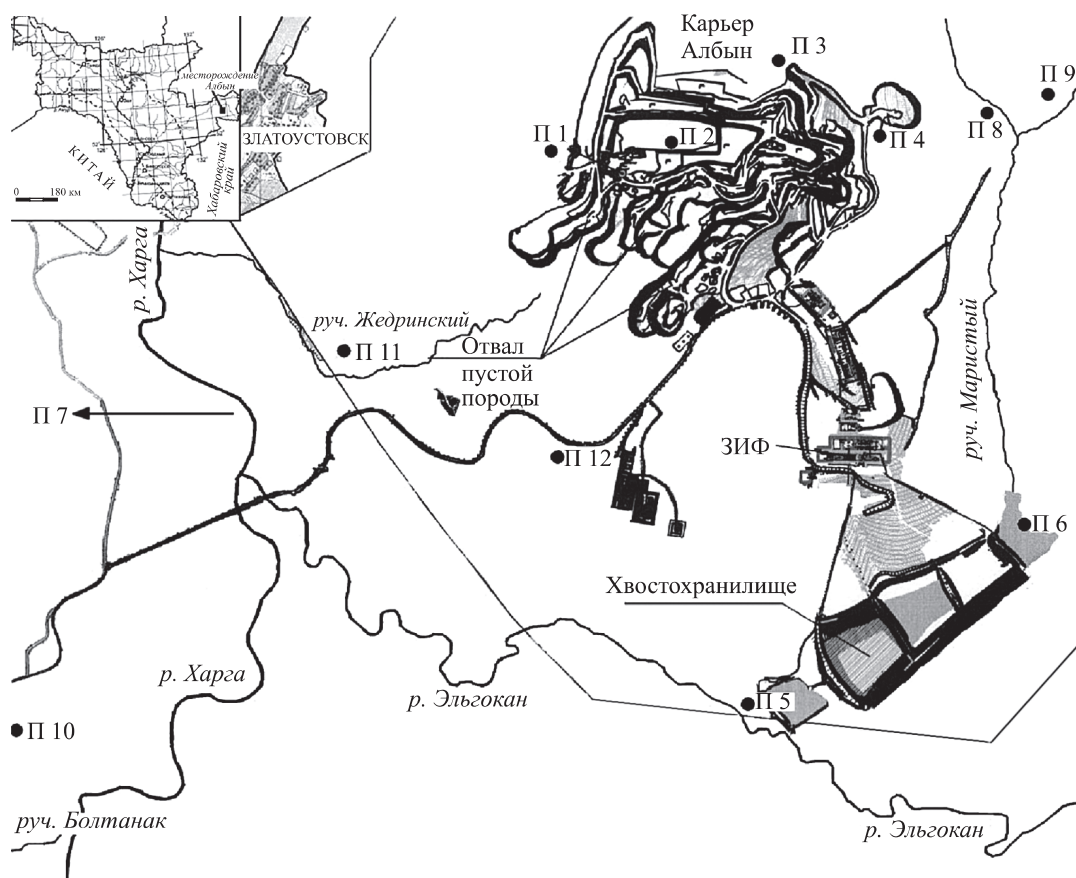


Рис. 1. Схема расположения рудника "Албын" на топооснове М 1 : 50000, места отбора почвенных проб и их номера (П1 – П12). Врезка — карта Амурской области.

щадка также характеризовалась скудной растительностью, были отобраны образцы багульника наибольшего (*Ledum maximum* (Nakai) Khokhr. et Maz.), мари белой (*Chenopodium album* L.), персикирии развесистой (*Persicaria lapathifolia* (L.) S. F. Gray), злаков и осоки. Отбор проб проводили в июле–августе 2013–2014 гг. в период максимального развития вегетативной части растений.

Для оценки количества подвижных форм РЗЭ в почвах проведено параллельное экстрагирование растворами: 1 М аммонийно-ацетатным буфером ( $\text{NH}_4\text{Ac}$ ) с рН 4.8; 1% этилендиаминтетрауксусной кислоты (ЭДТА) в 1 М  $\text{NH}_4\text{Ac}$ ; 1 М  $\text{HCl}$  при соотношении почва–раствор 1:10 и времени экстракции 1 час [9]. Раствор 1 М  $\text{NH}_4\text{Ac}$  с рН 4.8 предположительно извлекает из почв обменные формы металлов – наиболее подвижные легкогидролизуемые соединения [6]. Раствор 1% ЭДТА в аммонийно-ацетатном буфере с рН 4.8, помимо обменных форм, предположительно переводит в раствор металлы в форме непрочно удерживаемых органических комплексов. По разнице между содержанием металлов в вытяжках 1% ЭДТА в 1 М  $\text{NH}_4\text{Ac}$  и 1 М  $\text{NH}_4\text{Ac}$  рассчитано содержание РЗЭ в составе органоминеральных комплексов.

Содержание РЗЭ в вытяжке 1М  $\text{HCl}$  характеризует потенциальный запас подвижных соединений металлов в почве. Кислоторастворимые соединения РЗЭ предположительно представлены обменными и специфически сорбированными соединениями металлов. Содержание последних находили по разнице между их количествами, извлекаемыми вытяжками 1 М  $\text{HCl}$  и 1 М  $\text{NH}_4\text{Ac}$  [9].

Для того чтобы нивелировать разную степень распространенности и установить изменения РЗЭ в природных компонентах, состав изучаемых РЗЭ нормализовали на состав РЗЭ в хондритах [4].

Церий и европий могут менять степень окисления в природных процессах, в результате чего они могут отличаться от остальных РЗЭ. Величину фракционирования церия ( $\text{Ce}/\text{Ce}^*$ ) относительно трехвалентных РЗЭ обычно называют аномалией церия и рассчитывают как

$$\text{Ce}/\text{Ce}^* = 2(\text{Ce}_n)/(\text{La}_n + \text{Pr}_n), \text{ где } \text{Ce}_n = \text{Ce}/\text{Ce}^{\text{хондрит}}.$$

Величина фракционирования европия оценивается аналогично церию, только в расчетах фигурируют соседи европия – самарий и гадолиний.

Содержание элементов в пробах горных пород, почв, почвенных вытяжках и растительности определяли масс-спектральным (X-7, *Thermo Elemental*, США) и атомно-эмиссионным (ICAP-61, *Thermo Jarrell Ash*, США) методами ана-

лиза в Аналитическом сертификационном испытательном центре ФГБУН Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН.

Коэффициенты накопления (КН) были рассчитаны как отношение содержания элемента в сухой массе растений к содержанию его подвижных форм в почве. Степень техногенного влияния на почвы Албынского месторождения характеризовали коэффициентами концентраций относительно фона  $K_c = C/C_f$ , где  $C$  – содержание элемента в верхнем горизонте почв поля месторождения. Геохимический состав почв выражали формулой, в нижних индексах которой указаны  $K_c$  РЗЭ.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### Общая геологическая характеристика объекта исследований

Албынское золоторудное месторождение расположено на юго-западе Харгинского рудного поля в пределах Верхнеселемджинского золотоносного района Амуро-Охотского звена Монголо-Охотской складчатой системы. Геологическое строение района осложнено разрывными нарушениями, среди которых главные – Унгличканский и Курумканский разломы субширотного простирания. Последний проходит в центральной части рудоносной площади. Зоны разломов характеризуются расланцеванием, милонитизацией, трещиноватостью и окварцеванием пород. Субмеридиональные разрывные нарушения немногочисленны, относятся к сбросо-сдвигам, имеют значительные вертикальные перемещения. Нарушения этой системы контролируют размещение селитканского интрузивного комплекса.

Месторождение Албын залегает в пределах северного крыла Эльгоканского купола, относящегося к структурному подэтажу афанасьевской свиты  $PZ_1$  возраста. Крылья антиклинали осложнены послонными интрузиями метабазитов, многочисленными дайками и разломами. Контакты метабазитов с вмещающими породами тектонические. Характерная черта геологического строения этой части купола – наличие многочисленных лежащих изоклинальных складок высоких порядков, вплоть до пloyчатых. Наиболее интенсивно складчатость и расланцованность пород проявлены в метабазитах афанасьевской свиты. Нерасчлененные отложения афанасьевской свиты занимают  $\geq 80\%$  площади, вмещают все известные рудные тела и слагают Эльгоканский купол (горст-антиклиналь). Свита представлена довольно моно-

Таблица 1. Содержание РЗЭ в породах (мг/кг) Албынского месторождения

Элемент	Рудоносные метасоматиты ( $n = 16$ )			Слюдистые сланцы ( $n = 7$ )			Парагнейсы и парасланцы [3]	Метабазиты [3]	Граниты [3]
	средн.	min	max	средн.	min	max			
La	47.48	8.35	73.38	29.32	26.61	31.62	32	12	48
Ce	96.14	17.5	139.4	71.69	59.9	83.4	76	26	72
Pr	9.97	2.0	14.26	7.43	6.60	7.86	11	3.2	7.4
Nd	36.14	9.66	51.74	28.34	26.15	30.32	36	13	31
Sm	6.66	2.66	10.37	5.72	5.61	6.03	6.4	3.7	7.5
Eu	1.85	0.96	3.27	1.40	1.20	1.58	1.4	1.4	1.4
Gd	6.16	4.12	10.55	5.52	5.27	5.36	7.5	3.9	6.8
Tb	0.93	0.56	1.49	0.78	0.77	0.82	0.94	0.88	1.1
Dy	5.63	3.42	8.56	4.75	4.51	5.16	5.7	4.2	5
Ho	1.10	0.66	1.66	0.93	0.83	1.02	1.7	1	1.3
Er	3.03	2.01	4.86	2.56	2.28	2.83	3.2	2.5	3.1
Tm	0.39	0.24	0.64	0.34	0.30	0.36	—	—	—
Yb	2.38	1.47	3.77	1.97	1.73	2.08	2.5	2.9	4
Lu	0.35	0.21	0.58	0.24	0.23	0.25	0.54	0.48	0.9
$\Sigma$ РЗЭ	218.2	64.3	310.6	161.0	142.0	178.7	184.9	75.2	189.5
$\Sigma$ LPЗЭ	198.2	41.5	286.3	143.9	126.1	160.8	162.8	59.3	167.3
$\Sigma$ TPЗЭ	20	22.8	24.3	17.1	15.9	17.9	22.1	15.9	22.2
$La_n/Yb_n$	15.02	1.51	23.5	9.61	7.87	12.35	8.63	2.79	8.09
Eu/Eu*	0.87	0.54	1.28	0.73	0.66	0.84	0.62	1.12	0.59
Ce/Ce*	1.01	0.94	1.08	1.1	1.0	1.24	0.97	0.99	0.83

Примечание.  $\Sigma$ РЗЭ — общая сумма РЗЭ;  $\Sigma$ LPЗЭ — сумма легких РЗЭ (от La до Eu);  $\Sigma$ TPЗЭ — сумма тяжелых (Gd до Lu),  $n$  — количество образцов.

тонной толщей переслаивающихся слабометаморфизованных (фашия зеленых сланцев) сланцев, среди которых резко преобладают ( $\approx 70\%$ ) темноокрашенные (углеродистые) мусковит-альбит-кварцевые разности, переслаивающиеся со светлоокрашенными биотит-мусковит-альбит-кварцевыми и альбит-хлорит-эпидот-амфиболовыми сланцами. Макроскопически породы характеризуются хорошо выраженными грубосланцеватой и плейчатой текстурами, обусловленными чередованием слоев темно-серого, светло-серого и зеленовато-серого цветов, мощностью от долей сантиметров до 10–15 м. Светлоокрашенные сланцы отличаются от темноокрашенных разностей в основном отсутствием углеродистого вещества, большим количеством карбоната, хлорита, эпидота и рудных минералов.

Рудовмещающие метасоматиты Албынского месторождения локализованы в метабазитах афанасьевской свиты, которые контролируются подошвой надвига. На месторождении выделено 5 рудных тел, локализованных в разных частях двух сближенных зон метасоматитов, — это пластообразные субсогласные залежи. Средняя мощность рудных тел 3.1–7.3 м, они прослежены

на 180–1850 м по простиранию и до 350 м по падению. Промышленные руды сосредоточены в центральной части рудной зоны на отрезке длиной около 2 км в вершине руч. Албын.

Рудные минералы, по нашим исследованиям, составляют в среднем 3–5% с вариациями от единичных зерен до 15%. Преобладают пирит, арсенипирит, в меньшей степени магнетит, ильменит. Отмечаются знаки халькопирита, сфалерита и микровключения самородного золота. Руды месторождения Албын относятся к золото-кварцевому убогосульфидному типу. Золото ассоциировано главным образом с породообразующими минералами и сульфидами. Акцессорные минералы представлены микроскопическими и крайне мелкими выделениями граната, рутила, апатита, циркона и турмалина.

Основной путь поступления редкоземельных элементов в почву — денудационное разрушение подстилающих горных пород. Данные по содержанию РЗЭ в породах Албынского золоторудного месторождения приведены в табл. 1. Рудоносные породы обогащены редкоземельными элементами. Содержания РЗЭ в породах Албынского ме-

Таблица 2. Химический состав минералов (микрозонд, мас. %)

Компонент	Спектр						
	1	13	14	18	19	23	24
	Содержание, %						
F	—	5.57	1.48	—	3.82	3.46	2,36
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	29.93	—	—	—	—	—	—
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	16.1	3.23	—	1.34
SiO <sub>2</sub>	—	0.94	1.48	30.96	6.10	—	2.87
K <sub>2</sub> O	—	—	—	—	—	—	0.53
CaO	0.35	1.50	9.37	9.5	4.58	2.0	15.95
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	1.43	1.27	18.63	3.77	—	0.87
SrO	—	0.72	1.29	—	—	0.98	—
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	1.7	—	1.05	1.05	0.75
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.67	15.69	13.65	6.29	13.86	15.68	11.38
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	31.43	29.28	23.22	11.88	25.29	30.17	19.47
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.29	3.08	1.63	—	2.22	2.94	—
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.96	10.35	8.42	2.38	8.32	10.46	7.73
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.37	1.79	—	—	0.94	1.10	—
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.12	—	1.38	—	—	1.21	0.84
ThO <sub>2</sub>	1.70	2.69	2.16	—	2.39	2.01	—

Примечание. — Не обнаружено.

сторождения варьируют от 218.2 (среднее для рудоносных метасоматитов) до 161 г/т (для сланцев). Для всех пород месторождения отмечается преобладание лантаноидов цериевой группы (La<sub>n</sub>/Yb<sub>n</sub> изменяется от 1.51 до 23.5).

В составе рудоносных пород месторождения редкоземельная минерализация представлена в основном алланитом (табл. 2, спектр 18) и монацитом (табл. 2, спектр 1). В составе кварц-альбит-хлорит-биотитовых метасоматитов микрозондовыми исследованиями впервые установлены редкоземельные минералы фторбритолит (табл. 2, спектр 13), фторбритолит-(Y) (табл. 2, спектры 14, 19, 23, 24). Во фторбритолите, фторбритолите-(Y) и алланите наряду с преобладанием Ce и La в значительной мере присутствует Nd (до 10.93 мас.%). Кроме того, содержатся легкие (Pr, Sm) и тяжелые (Gd) РЗЭ; практически во всех минералах присутствует Y. У этих минералов разная устойчивость к выветриванию; например, в кислой среде фосфаты и карбонаты лантаноидов неустойчивы. Различная растворимость минералов, содержащих РЗЭ, определяет особенности фракционирования лантаноидов в почве.

#### Распределение редкоземельных элементов в почвах Албынского месторождения

Месторождение расположено в физико-географическом районе Амурской области, называемым Горный Север, который представлен природными

горно-таежными и гольцовыми ландшафтами на многолетнемерзлых породах. По данным управления Амурской обл. по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, климат района резко континентальный с суровой продолжительной зимой (средняя температура января  $-33^{\circ}\text{C}$  при минимуме  $-52^{\circ}\text{C}$ ) и жарким коротким летом (средняя температура июля  $+13^{\circ}\text{C}$ , при максимуме  $+35^{\circ}\text{C}$ ), среднегодовым количеством осадков 743.5 мм, из которых в июле выпадает 185–200 мм. Почвы на участке Албынского золоторудного месторождения горные буро-таежные иллювиально-гумусовые, по сложению маломощные, содержат во всех горизонтах большое количество щебня, по механическому составу относятся к хрящевато-каменистым суглинкам с очень небольшим содержанием илистой фракции. Основной причиной каменистости почв следует считать медленное выветривание горных пород.

Разработка Албынского рудника повлекла за собой нарушение естественного почвенного покрова на значительной территории и формирование специфических техногенно нарушенных почв, которые перемешаны со щебенкой и обломочным материалом коренных пород. Заселение таких участков естественной растительностью затруднено.

Концентрации РЗЭ в почвах зависят от свойств почвообразующей породы, степени выветренности, генезиса почв, содержания глинистых мине-

Таблица 3. Содержание редкоземельных элементов в почвах (мг/кг)

Элемент	Природные почвы										Грунты			Среднее	Фон П7	Почвы мира
	П1	П2	П3	П4	П8	П9	П10	П5	П6	П12	П11					
La	34.8	18.8	13.3	18.8	9.86	10.5	51.47	18.6	13.7	38.66	32.82	23.75	3.8	40		
Ce	73.3	35.8	38.8	41.9	20.9	23.7	84.59	48.6	37.4	86.42	69.54	50.99	10.1	50		
Pr	8.1	5.1	3.5	5.4	2.45	3.39	11.54	5	3.8	9.8	7.7	5.98	0.82	7		
Nd	31.2	20.8	14.7	24.4	9.67	15.5	40.97	19.9	15.8	35.64	28.2	23.35	3.6	35		
Sm	6.4	4.4	3.3	6.7	2.26	4.6	7.46	4.4	3.6	6.74	5.49	5.03	0.82	4.5		
Eu	1.5	0.92	0.72	2.1	0.6	1.5	1.56	0.9	0.71	1.31	1.25	1.19	0.15	1		
Gd	5.9	4.3	3.4	8.1	2.82	6.26	7.67	3.8	3.3	6.66	5.8	5.27	0.79	4		
Tb	0.88	0.61	0.51	1.3	0.44	1.05	0.97	0.55	0.46	0.79	0.75	0.76	0.089	0.7		
Dy	5.3	3.8	3.4	8.4	2.71	6.43	4.8	3.5	2.8	3.73	3.77	4.42	0.93	5		
Ho	1.1	0.73	0.69	1.8	0.6	1.39	0.91	0.72	0.55	0.71	0.76	0.91	0.19	0.6		
Er	3	2.1	2.2	5.1	1.77	3.87	2.46	2.1	1.6	1.92	2.05	2.56	0.62	2		
Tm	0.39	0.27	0.3	0.67	0.27	0.54	0.33	0.29	0.2	0.26	0.29	0.35	0.089	0.6		
Yb	2.6	1.7	1.9	4.2	1.69	3.24	2.01	1.9	1.4	1.53	1.71	2.17	0.68	3		
Lu	0.34	0.24	0.29	0.57	0.23	0.45	0.29	0.27	0.21	0.22	0.24	0.30	0.12	0.4		
ΣP3Э	174.8	99.57	87	129	56.2	82.4	217	111	85.53	194.4	160.4	127.0	22.8			
ΣLP3Э	155.3	85.82	74.3	99.3	45.7	59.2	196	97.4	75.01	178.6	145	110.1	19.29			
ΣTP3Э	19.51	13.75	12.7	30.1	10.5	23.2	21	13.1	10.52	15.82	15.37	16.88	3.51			
Eu/Eu*	0.71	0.64	0.64	0.85	0.72	0.85	0.63	0.65	0.61	0.59	0.67	0.69	0.58			
Ce/Ce*	1.01	0.86	1.34	0.99	1	0.95	0.8	1.2	1.23	1.04	1.02	1.04	1.32			

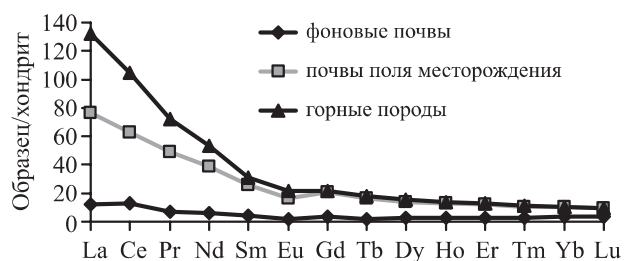


Рис. 2. Концентрация РЗЭ в почвах, породах Албынского золоторудного месторождения, нормированные к среднему составу хондрита.

ралов и органического вещества, уровня антропогенных нагрузок и ряда других факторов [12]. Распределение РЗЭ в почвах Албынского золоторудного месторождения представлено в табл. 3 и на рис. 2. Содержание РЗЭ в фоновых почвах изучаемого района ниже по сравнению с их средними концентрациями в почвах мира [18], что, по-видимому, объясняется незначительным содержанием РЗЭ в почвообразующих породах.

В почвах рудного поля месторождения в связи с открытыми горными работами с разной интенсивностью аккумулируются химические элементы, что приводит к формированию в поверхностных горизонтах техногенных аномалий [14–16]. По значениям Кс РЗЭ образуют ряд:  $Tb_{8,5} > Eu_{7,9} > Pr_{7,3} > Gd_{6,7} > Nd_{6,5} > La_{6,3} > Sm_{6,1} > Ce_{5,0} > Ho_{4,8} > Dy_{4,8} > Er_{4,1} > Tm_{3,9} > Yb_{3,2} > Lu_{2,5}$ . Несмотря на то что среднее содержание РЗЭ в почвах рудного поля в 3–9 раз выше, чем фоновые концентрации, однако для ряда элементов эти значения ниже данных для почв мира, за исключением Ce, Sm, Eu, Gd, Tb, Ho, Er.

По уменьшению концентраций РЗЭ образуют следующие ряды: почвы Албынского золоторудного поля  $Ce > La > Nd > Pr > Gd \sim Sm > Dy > Er > Yb > Eu > Ho > Tb > Tm > Lu$ ; фоновые почвы  $Ce > La \sim Nd > Dy > Pr \sim Sm > Gd > Yb > Er > Ho > Eu > Lu > Tb \sim Tm$ . Следует отметить, что убывающий ряд по концентрациям РЗЭ в почвах Албынского золоторудного месторождения полностью идентичен распределению РЗЭ в рудоносных метасоматитах. Характерной чертой распределения РЗЭ в почвах является их обогащение легкими лантаноидами по отношению к тяжелым. Наибольшее общее содержание РЗЭ в почвах рудника отмечено для Ce (21–86 мг/кг), La (21–39 мг/кг), самое низкое – для Lu (0.21–0.34 мг/кг). Содержание более 2 мг/кг наблюдается для 9 элементов: 7 – с четными номерами: Ce (58), Nd (60), Sm (62), Gd (64), Dy (66), Er (68) и Yb (70) и 2 – с нечетными: La (57), Pr (59) (см. табл. 3). Содержание менее 2 мг/кг характер-

но для пяти элементов с нечетными номерами: Eu (63), Tb (65), Ho (67), Tm (69) Lu (71).

На рис. 2, характеризующем распределение лантаноидов в изученных техногенных и фоновых почвах, видно, что спектры РЗЭ имеют отрицательную европиевую аномалию ( $Eu/Eu^*$ ): 0.69 и 0.58 соответственно. Аномальное распределение церия практически отсутствует в техногенных почвах ( $Ce/Ce^* = 1.04$ ), а для фоновых почв составляет 1.32.

Сравнивая нормированные к среднему составу хондрита концентрации РЗЭ в породах и почвах на Албынском золоторудном месторождении (см. рис. 2), можно видеть, что сформированные почвы в данном регионе обеднены РЗЭ по сравнению с материнскими породами. Причем легкие лантаноиды выщелачиваются сильнее, чем тяжелые. По сравнению с породой содержание легкого лантана в почвах сократилось в среднем на 42%, тогда как тяжелого лютеция только на 2.4%. Вероятно, легкие лантаниды входят в состав менее устойчивых минералов.

#### Фракционный состав РЗЭ в изученных почвах

Запас химических элементов в почве, способных переходить в ткани растений, характеризует группа их непрочно связанных соединений, которая включает обменные, комплексные и специфически сорбированные формы [7, 8, 10, 13]. Степень их доступности для растений уменьшается в ряду: обменные > комплексные > специфически сорбированные. Для фоновой территории на подвижные формы РЗЭ приходятся следующие значения (мг/кг):  $Ce(6.21) > La(2.24) > Nd(1.62) > Pr(0.46) > Gd(0.33) > Sm(0.32) > Dy(0.31) > Er(0.15) > Yb(0.11) > Eu(0.07) > Ho(0.06) > Tb(0.05) > Tm(0.02) > Lu(0.01)$ . Эти соединения в основном представлены специфически сорбированными и комплексными формами (табл. 4). Остаточная консервативная фракция, которая отражает количество соединений РЗЭ, не способных высвободиться в почвенный раствор и включаться в биогеохимический круговорот, является доминирующей для Nd, Eu, Gd, Sm, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu. Ее доля в среднем (в % от валового содержания) возрастает от 55 до 90% с ростом порядкового номера элемента.

Аэрогенный перенос РЗЭ, связанный прежде всего с производством горных работ (буровзрывные работы, добыча и транспортировка руды, складирование пустой породы в отвалах), может обусловить дополнительное насыщение компонентов природных ландшафтов окрестностей рудника этими элементами. В почвах террито-

Таблица 4. Фракционный состав РЗЭ в почвах: подвижные формы, мг/кг (числитель), % от валового содержания (знаменатель)

Элемент	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
	Обменные формы													
П1	2.9	4.64	0.67	2.86	0.61	0.13	0.58	0.078	0.4	0.07	0.16	0.016	0.089	0.01
	8.33	6.33	8.27	9.17	9.56	8.97	9.75	8.86	7.53	6.67	5.42	4.10	3.48	2.94
П2	1.91	3.46	0.49	2.22	0.49	0.11	0.52	0.07	0.39	0.08	0.18	0.02	0.11	0.01
	10.18	9.66	9.53	10.68	11.14	11.96	12.15	11.48	10.37	9.59	8.74	7.41	6.43	4.17
П4	2.34	3.88	0.53	2.25	0.48	0.11	0.46	0.064	0.32	0.057	0.13	0.014	0.071	0.009
	12.46	9.25	9.76	9.21	7.17	5.34	5.67	4.89	3.82	3.20	2.55	2.09	1.69	1.58
П5	2.49	5.29	0.56	2.24	0.46	0.10	0.43	0.061	0.32	0.058	0.14	0.016	0.087	0.011
	13.41	10.89	11.29	11.27	10.43	11.11	11.2	11.09	9.17	8.06	6.57	5.52	4.58	4.07
П6	2.08	5.56	0.48	2.0	0.43	0.10	0.44	0.065	0.37	0.071	0.18	0.02	0.13	0.017
	15.22	14.85	12.50	12.66	11.91	14.08	13.37	14.13	13.12	12.96	11.32	10.0	9.29	8.10
П7	0.43	1.1	0.086	0.35	0.082	0.017	0.082	0.013	0.074	0.013	0.031	0.0038	0.02	0.0027
	11.38	10.86	10.49	9.86	10.0	11.33	10.38	13.44	7.96	6.84	5.0	4.22	2.94	2.25
Органо-минеральные комплексные соединения														
П1	5.51	9	1.2	4.36	0.76	0.16	0.64	0.1	0.51	0.093	0.23	0.028	0.15	0.02
	15.82	12.29	14.8	13.97	11.91	11.03	10.76	11.36	9.6	8.86	7.8	7.18	5.86	5.88
П2	7.66	13.89	1.79	6.66	1.24	0.25	1.11	0.18	0.95	0.17	0.47	0.06	0.34	0.04
	40.81	38.79	34.82	32.05	28.18	27.17	25.93	29.51	25.27	23.29	22.82	22.22	19.88	16.67
П4	3.86	6.43	0.84	3	0.53	0.11	0.47	0.07	0.37	0.065	0.17	0.02	0.11	0.012
	20.55	15.34	15.5	12.27	7.92	5.34	5.8	5.34	4.42	3.65	3.34	2.99	2.62	2.11
П5	1.56	4.67	0.36	1.36	0.24	0.05	0.21	0.032	0.18	0.031	0.084	0.012	0.073	0.009
	8.4	9.62	7.26	6.84	5.44	5.56	5.47	5.82	5.16	4.31	3.96	4.14	3.84	3.33
П6	0.98	5.34	0.29	1.07	0.23	0.053	0.23	0.041	0.24	0.043	0.12	0.018	0.11	0.015
	7.17	14.26	7.55	6.77	6.37	7.46	6.99	8.91	8.51	7.82	7.55	9.00	7.86	7.14
П7	0.81	2.33	0.17	0.58	0.11	0.021	0.11	0.019	0.1	0.02	0.05	0.0062	0.037	0.0038
	21.43	23	20.7	16.34	13.41	14	13.92	21.11	10.75	10.53	8.06	6.89	5.44	3.17
Специфически сорбированные формы														
П1	8.79	15.66	2.03	7.43	1.28	0.27	1.09	0.16	0.81	0.15	0.37	0.043	0.23	0.029
	25.24	21.38	25.06	23.81	20.06	18.62	18.32	18.18	15.25	14.29	12.54	11.03	8.98	8.53
П2	8.75	15.54	1.99	7.17	1.38	0.29	1.23	0.19	1.03	0.19	0.52	0.06	0.38	0.05
	46.62	43.4	38.72	34.5	31.36	31.52	28.74	31.15	27.39	26.03	25.24	22.23	22.22	20.83
П4	4.6	7.98	0.99	3.59	0.64	0.13	0.56	0.086	0.45	0.079	0.2	0.024	0.15	0.018
	24.49	19.03	18.23	14.69	9.57	6.31	6.91	6.56	5.37	4.44	3.93	3.58	3.57	3.16
П5	6.8	13.23	1.63	5.91	1.08	0.21	0.87	0.13	0.63	0.11	0.28	0.033	0.19	0.024
	36.62	27.24	32.86	29.73	24.49	23.33	22.66	23.64	18.05	15.28	13.15	11.38	10	8.89
П6	3.59	8.2	0.9	3.41	0.64	0.13	0.57	0.089	0.46	0.085	0.22	0.031	0.18	0.024
	26.26	21.9	23.44	21.58	17.73	18.31	17.33	19.35	16.31	15.45	13.84	15.5	12.86	11.43
П7	1	2.78	0.2	0.69	0.13	0.03	0.14	0.025	0.14	0.026	0.066	0.008	0.05	0.006
	26.46	27.44	24.39	19.44	15.85	20	17.72	27.78	15.05	13.68	10.65	8.67	7.35	5



рии рудника вследствие загрязнения увеличивается группа непрочносвязанных соединений РЗЭ. Среднее содержание подвижных форм РЗЭ в почве фона и техногенно нарушенных территорий различалось в 3–13 раз (см. табл. 4). Рассматриваемые элементы по степени подвижности в отношении актуальных запасов располагаются в ряд, который практически идентичен с фоновой территорией (мг/кг): Ce(24.55) > La(12.76) > Nd(11.11) > Pr(2.95) > Sm(2.1) > Gd(1.88) > Dy(1.49) > Er(0.69) > Yb(0.48) > Eu(0.44) > Tb(0.28) > Ho(0.27) > Tm(0.084) > Lu(0.06). Наиболее подвижны Ce и La, что связано с особенностями строения их ионов. В ряду от лантана до лютеция радиусы трехвалентных ионов РЗЭ уменьшаются от 1.04 до 0.8 Å, и из-за больших радиусов связывание их ионов с почвенно-поглощательным комплексом менее эффективно.

Содержание наиболее подвижных обменных форм элементов в почвах Албынского рудника довольно низкое. В эту вытяжку переходит в среднем следующее количество РЗЭ (мг/кг): Ce(4.57) > La(2.34) > Nd(2.31) > Pr(0.55) > Sm(0.49) = Gd(0.49) > Dy(0.36) > Er(0.16) > Eu(0.11) > Yb(0.10) > Tb(0.07) = Ho(0.07) > Tm(0.02) > Lu(0.01). Самое большое содержание в данной фракции характерно для Ce, что свидетельствует о его высокой миграционной способности. Наибольшие концентрации металлов были зафиксированы во фракции, представленной специфически сорбированными формами (мг/кг): Ce(12.12) > La(6.51) > Nd(5.50) > Pr(1.51) > Sm(1.00) > Gd(0.86) > Dy(0.68) > Er(0.32) > Yb(0.23) > Eu(0.21) > Tb(0.13) > Ho(0.12) > Tm(0.04) > Lu(0.028). Эту фракцию можно рассматривать как промежуточную, переходную к прочносвязанным [10]. В исследованных почвах Албынского золоторудного месторождения остаточная фракция РЗЭ также является доминирующей. Для большинства элементов доля этой фракции составляет 60–80%, содержание La, Ce, Pr, Nd достаточно высокое и составляет 40–50% от валового содержания.

Выявленные закономерности фракционного состава РЗЭ имеют экологическое значение, так как позволяют прогнозировать направление процессов миграции РЗЭ и поступления их в растительность.

#### Редкоземельные элементы в растительности

Содержание РЗЭ в фоновой растительности и траве укоса с территории Албынского рудника представлено в табл. 5. По градиенту содержания в растениях, произрастающих на территории месторождения, РЗЭ располагались в следующем порядке (мг/кг): Ce(1.76) > La(1.32) > Nd(0.77) >

> Pr(0.21) > Gd(0.15) > Sm(0.13) > Dy(0.11) > Er(0.056) > Yb(0.034) > Eu(0.028) > Tb(0.021) = Ho(0.021) > Tm(0.0066) > Lu(0.0045). Ранее [5] было показано, что содержание РЗЭ в растениях убывает в порядке возрастания их атомных масс с учетом различия кларков металлов. Порядок расположения элементов в растениях с фоновой территории практически идентичен, менялись местами только Ce и La, Dy и Sm. Следует отметить, что среднее содержание РЗЭ в растениях, произрастающих на территории Албынского рудника, ниже, чем фоновые концентрации в растениях незагрязненных экосистем. Вследствие того, что РЗЭ не являются биогенными, жизненно важными для растений, для них существует биологический барьер, препятствующий их переходу из питающей среды в растения. Вероятно, по мере возрастания антропогенной нагрузки на природные фитоценозы реакция растений направлена на частичную компенсацию негативного влияния, что обеспечивает им возможность нормального длительного физиологического функционирования при высокой концентрации металлов в среде.

Наибольшие концентрации РЗЭ обнаружены в *Chamerion angustifolium*, *Persicaria lapathifolia*, а наименьшее содержание отмечено в *Ledum hypoleucum* и *Carex rhynchofysa*.

Интенсивность внешнего воздействия на состав растений и вклад конкретных химических элементов в этот процесс отражают параметры взаимосвязи концентраций в системе “почва – растение”, к которым, в частности, относятся коэффициенты накопления.

Коэффициент накопления (КН), характеризующий степень использования растениями подвижных форм элементов из почвы, есть критерий оценки количества металлов, перешедших из почвы в растения. Этот показатель можно использовать в качестве количественной меры защитной функции системы “почва – растение”, так как, с одной стороны, он характеризует изменение подвижности металлов при загрязнении почв, с другой – отклик растений на это изменение. Было предложено [11] использовать при расчете КН содержание всей группы подвижных соединений, включающей обменные, комплексные и специфически сорбированные формы. Результаты расчета коэффициентов накопления показали, что способность растений к депонированию рассматриваемых элементов в данных условиях невелика (табл. 6). Наиболее интенсивно растениями поглощается La (КН изменяется от 0.022 до 3.55). По интенсивности накопления РЗЭ растительностью из техногенно загрязненных почв образу-

Таблица 5. Среднее содержание РЗЭ в надземной воздушно-сухой массе растений, мг/кг

Точка отбора	Вид растительности	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
П1		0.37	0.59	0.066	0.25	0.046	0.009	0.044	0.0065	0.034	0.0064	0.017	0.0021	0.012	0.0015
П2	трава укоса	0.57	0.97	0.11	0.4	0.073	0.015	0.069	0.0099	0.052	0.0093	0.024	0.003	0.017	0.0021
П3		0.41	0.63	0.068	0.26	0.048	0.0094	0.045	0.0064	0.035	0.0065	0.018	0.0022	0.013	0.0015
П4	клевер	0.69	1.3	0.14	0.55	0.11	0.022	0.095	0.014	0.077	0.014	0.04	0.0052	0.031	0.0037
П4	осока	1.1	2	0.24	0.88	0.17	0.041	0.16	0.025	0.14	0.026	0.071	0.009	0.053	0.0063
П5	польнь	1.1	1.5	0.19	0.79	0.15	0.039	0.2	0.028	0.15	0.03	0.079	0.0085	0.046	0.0067
П6	осока	0.55	1.1	0.12	0.45	0.086	0.017	0.081	0.012	0.07	0.013	0.036	0.0047	0.028	0.0038
П6	иван-чай	5.8	6	0.72	2.55	0.36	0.069	0.47	0.064	0.33	0.066	0.16	0.018	0.075	0.01
	среднее	1.32	1.76	0.21	0.77	0.13	0.028	0.15	0.021	0.11	0.021	0.056	0.0066	0.034	0.0045
П7	багульник	0.12	0.26	0.028	0.11	0.02	0.0032	0.019	0.0027	0.014	0.0028	0.008	0.001	0.0063	0.00082
П7	осока	0.21	0.37	0.04	0.15	0.027	0.0049	0.025	0.0038	0.02	0.0038	0.011	0.0014	0.0083	0.0011
П7	горец	3.3	3.0	0.39	1.4	0.19	0.047	0.22	0.032	0.18	0.035	0.095	0.011	0.059	0.0076
П7	марь белая	7.9	6.7	0.98	3.3	0.46	0.11	0.54	0.077	0.42	0.079	0.20	0.022	0.12	0.016
П7	злаки	1.2	1.6	0.19	0.72	0.13	0.032	0.12	0.018	0.10	0.019	0.051	0.0064	0.039	0.0048
	среднее	2.55	2.39	0.33	1.14	0.17	0.039	0.18	0.027	0.15	0.028	0.073	0.0084	0.047	0.0061

Таблица 6. Разброс коэффициентов накопления РЗЭ в растительности Албынского золоторудного месторождения

Зона	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Рудник	max	0.87	0.31	0.43	0.39	0.28	0.38	0.33	0.31	0.33	0.31	0.26	0.18	0.18
	min	0.022	0.02	0.017	0.017	0.017	0.019	0.019	0.02	0.02	0.021	0.009	0.02	0.021
	среднее	0.16	0.086	0.1	0.1	0.082	0.1	0.094	0.094	0.1	0.1	0.095	0.088	0.091
Фон	max	3.55	1.08	2.15	2.01	1.43	1.62	1.36	1.33	1.33	1.37	1.25	1.14	1.28
	min	0.054	0.042	0.061	0.068	0.062	0.057	0.047	0.045	0.047	0.054	0.056	0.059	0.066
	среднее	1.14	0.38	0.72	0.69	0.51	0.56	0.47	0.47	0.47	0.5	0.46	0.44	0.48

ется следующий ранжированный ряд: La > Pr = Nd = Gd = Ho = Er > Tm > Tb = Dy > Lu > Yb > Ce > Sm > Eu. Следует отметить, что интенсивность накопления этих элементов отличается незначительно.

По коэффициентам накопления растительностью РЗЭ на фоновой территории образуют несколько иной ряд: La > Pr > Eu > Gd > Nd > Sm > Er > Lu > Tb = Ho = Dy > Tm > Yb > Ce, причем значения коэффициентов для каждого из этих элементов выше, чем на техногенно загрязненных почвах.

Были проанализированы корреляционные связи между содержанием РЗЭ в растительности и содержанием их подвижных форм в поверхностных горизонтах почв. Влияние фракционного состава РЗЭ на растительность незначительно: только для Ce, Yb и Lu наблюдается значимая прямая зависимость от содержания в почвах их обменных форм ( $r = 0.52-0.54$ ). Для РЗЭ не выявлена достоверная связь между количеством металла в растениях и суммарным содержанием в почве их подвижных форм, отнесенных к группе непрочно связанных соединений.

## ВЫВОДЫ

1. Впервые получены данные об уровнях концентраций РЗЭ в буро-таежных почвах горно-таежного ландшафта Дальнего Востока. Отмечено наиболее высокое содержание Ce, La, Nd; наименьшее – Tm. Установлено, что верхние горизонты почв обеднены легкими и средними РЗЭ по сравнению с материнскими породами.

2. В техногенных почвах поля Албынского золоторудного месторождения, по сравнению с фоновыми почвами, увеличивается содержание группы непрочносвязанных соединений РЗЭ. Наибольшие концентрации металлов зафиксированы во фракции, представленной специфически сорбированными формами.

3. Реакция травянистых растений при возрастании содержания РЗЭ в почве направлена на частичную компенсацию негативного влияния элементов за счет активации механизмов биологического барьера, препятствующего их чрезмерному накоплению.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ван К., Ши Г.К., Су К.С., Су Б.Д., Чжао Д. Индуцированный лантаном и церием окислительный стресс у погруженных водных растений *Hydrilla verticillata* // Физиология растений. 2007. Т. 54. № 5. С. 781–785.

2. Винокуров С.Ф., Петренко Д.Б., Сычкова В.А., Тарасова Н.П. Распределение редкоземельных элементов в пробах снега – чувствительный показатель загрязнения окружающей среды // ДАН. 2014. Т. 456. № 3. С. 320–325.
3. Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. Екатеринбург: УРО РАН, 2009. 381 с.
4. Дубинин А.В. Геохимия редкоземельных элементов в океане. М.: Наука, 2006. 360 с.
5. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 439 с.
6. Кошелева Н.Е., Касимов Н.С., Власов Д.В. Факторы накопления тяжелых металлов и металлоидов на геохимических барьерах в городских почвах // Почвоведение. 2015. № 5. С. 536–553.
7. Кулик Е.Н., Радомская В.И. Изучение форм нахождения тяжелых металлов в бурой лесной почве при антропогенном воздействии // Аграрный научный журнал. 2011. № 7. С. 12–15.
8. Кулик Е.Н., Радомская В.И. Особенности транслкации тяжелых металлов в бобовые культуры при антропогенном воздействии // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2011. № 8. С. 83–88.
9. Манджиева С.С., Минкина Т.М., Мотузова Г.В., Головатый С.Е., Мирошниченко Н.Н., Лукашенко Н.К., Фатеев А.И. Фракционно групповой состав соединений цинка и свинца как показатель экологического состояния почв // Почвоведение. 2014. № 5. С. 632–640.
10. Минкина Т.М., Мотузова Г.В., Назаренко О.Г., Крыщенко В.С., Манджиева С.С. Формы соединений тяжелых металлов в почвах степной зоны // Почвоведение. 2008. № 7. С. 810–818.
11. Минкина Т.М., Мотузова Г.В., Мирошниченко Н.Н., Фатеев А.И., Манджиева С.С., Чаплыгин В.А. Накопление и распределение тяжелых металлов в растениях зоны техногенеза // Агрохимия. 2013. № 9. С. 65–75.
12. Переломов Л.В. Взаимодействие редкоземельных элементов с абиотическими и биотическими компонентами почв // Агрохимия. 2007. № 11. С. 85–96.
13. Радомская В.И., Моисеенко Н.В., Радомский С.М., Крылов А.В., Католла В.М., Моисеенко В.Г. Влияние осадков сточных вод на поведение тяжелых металлов в системе почва–растение // Агрохимия. 2006. № 1. С. 77–84.
14. Радомская В.И., Радомский С.М. Анализ влияния предприятий золотодобычи на состояние водных ресурсов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16. № 1-3. С. 920–923.
15. Радомская В.И., Радомский С.М., Павлова Л.М., Воронаева Е.Н. Геохимическая характеристика ланд-

шафтов Албынского золоторудного месторождения Приамурья // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2015. Т. 17. № 5-1. С. 298–303.

16. Радомская В.И., Радомский С.М., Павлова Л.М., Кулик Е.Н. Биогеохимический отклик ландшафта на воздействие открытого способа разработки на примере Албынского золоторудного месторождения Приамурья // Экологическая химия. 2015. Т. 24. № 4. С. 207–218.
17. Acres G.J.K., Harrison B. The Development of Catalysts for Emission Control from Motor Vehicles: Early Research at Johnson Matthey // Top. Catal. 2004. V. 28. P. 3–11.
18. Bowen H.J.M. Environmental chemistry of the elements. London: Academic Press, 1979. 333 p.

## REFERENCES

1. Wan, K., Shi, G.K., Su, K.S., Su, B.D., Zhao, D. *Indutirovanniy lantanom i seriem okislitel'ny stress u pogruzhennykh vodnykh rastenii Hydrilla verticillata* [Hydrophytes *Hydrilla verticillata* oxidative stress induced by lanthanum and cerium]. *Fiziologiya rastenii*, 2007, vol. 54, no. 5, pp. 781–785 (in Russian).
2. Vinokurov, S.F., Petrenko, D.B., Sychkova, V.A., Tarasova, N.P. *Raspredelenie redkozemel'nykh elementov v probakh snega – chuvstvitel'nyi pokazatel' zagryazneniya okruzhayushchei sredy* [REE distribution in snow samples as a sensitive indicator of environment pollution]. *Doklady Akademii Nauk*. 2014, vol. 456, no. 3, pp. 320–325 (in Russian).
3. Grigoryev, N.A. *Raspredelenie khimicheskikh elementov v verkhnei chasti kontinental'noi kory* [Distribution of chemical elements in the upper layer of continental crust]. Yekaterinburg, URO RAN, 2009, 381 p. (in Russian).
4. Dubinin, A.V. *Geokhimiya redkozemel'nykh elementov v okeane* [Geochemistry of rare-earth elements in the ocean]. Moscow: Nauka Publ., 2006, 360 p. (in Russian).
5. Kabata-Pendias, A., Pendias, H. *Mikroelementy v pochvakh i rasteniyakh* [Microelements in soils and plants]. Translated from English. Moscow: Mir Publ., 1989. 439 p. (in Russian).
6. Kosheleva, N.E., Kasimov, N.S., Vlasov, D.V. *Faktory nakopleniya tyazhelykh metallov i metalloïdov na geokhimicheskikh bar'erakh v gorodskikh pochvakh* [Factors of heavy metals and metalloïds accumulation on geochemical barriers in urban soils]. *Pochvovedenie*, 2015, no. 5, pp. 536–553 (in Russian).
7. Kulik, E.N., Radomskaya, V.I. *Izuchenie form nakhozheniya tyazhelykh metallov v buroi lesnoi pochve pri antropogennom vozdeistvii* [The study of heavy metal forms of occurrence in brown forest soil under the anthropogenic impact]. *Agrarnyi nauchnyi zhurnal*, 2011, no. 7, pp. 12–15 (in Russian).
8. Kulik, E.N., Radomskaya, V.I. *Osobennosti translokatsii tyazhelykh metallov v bobovye kul'tury pri antropogennom vozdeistvii* [Specifics of heavy metals translocation in bean cultures under anthropogenic impact]. *Vestnik Krasnoyarskogo gos. agrarnogo universiteta*, 2011, no. 8, pp. 83–88 (in Russian).
9. Mandzhieva, S.S., Minkina, T.M., Motuzova, G.V., Golovaty, S.E., Miroshnichenko, N.N., Lukashenko, N.K., Fateev, A.I. *Fraktsionno-grupповoi sostav soedinenii tsinka i svintsa kak pokazatel' ekologicheskogo sostyaniya pochv* [Fraction-group composition of zinc and lead compounds as the factor of ecological state of soils]. *Pochvovedenie*, 2014, no. 5, pp. 632–640 (in Russian).
10. Minkina, T.M., Motuzova, G.V., Nazarenko, O.G., Kryshchenko, V.S., Mandzhieva, S.S. *Formy soedinenii tyazhelykh metallov v pochvakh stepnoi zony* [Forms of heavy metals compounds in steppe zone soils]. *Pochvovedenie*, 2008, no. 7, pp. 810–818. (in Russian).
11. Minkina, T.M., Motuzova, G.V., Miroshnichenko, N.N., Fateev, A.I., Mandzhieva, S.S., Chaplygin, V.A. *Nakoplenie i raspredelenie tyazhelykh metallov v rasteniyakh zony tekhnogeneza* [Accumulation and distribution of heavy metals in plants in the technogenesis area]. *Agrokimiya*, 2013, no. 9, pp. 65–75 (in Russian).
12. Perelomov, L.V. *Vzaimodeistvie redkozemel'nykh elementov s abioticheskimi i bioticheskimi komponentami pochv* [Interaction of rare-earth elements with abiotic and biotic soil components]. *Agrokimiya*, 2007, no. 11, pp. 85–96 (in Russian).
13. Radomskaya, V.I., Moiseenko, N.V., Radomskii, S.M., Krylov, A.V., Katola, V.M., Moiseenko, V.G. *Vliyanie osadkov stochnykh vod na povedenie tyazhelykh metallov v sisteme pochva-rastenie* [The influence of sewage sludge on the behaviour of heavy metals in the soil-plant system]. *Agrokimiya*, 2006, no. 1, pp. 77–84 (in Russian).
14. Radomskaya, V.I., Radomskii, S.M. *Analiz vliyaniya predpriyatii zolotodobychi na sostoyanie vodnykh resursov* [The analysis of influence of the gold mining facilities on the state of aquatic resources]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2014, vol. 16, no. 1(3), pp. 920–923 (in Russian).
15. Radomskaya, V.I., Radomskii, S.M., Pavlova, L.M., Voropaeva, E.N. *Geokhimicheskaya kharakteristika landshavtov Albynskogo zolotorudnogo mestorozhdeniya Priamur'ya* [Geochemical characteristics of landscape in the Albynskoe gold ore deposit in the Amur region]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2015, vol. 17, no. 5, pp. 298–303 (in Russian).
16. Radomskaya, V.I., Radomskii, S.M., Pavlova, L.M., Kulik, E.N. *Biogeokhimicheskii otklik landshafta na vozdeistvie otkrytogo sposoba razrabotki na primere Albynskogo zolotorudnogo mestorozhdeniya Priamur'ya* [The landscape biogeochemical response to the open-cut mining impact by an example of Albynskoe gold ore deposit in the Amur region]. *Ekologicheskaya khimiya*, 2015, no. 24(4), pp. 207–218 (in Russian).
17. Acres, G.J.K., Harrison, B. The development of catalysts for emission control from motor vehicles: early research at Johnson Matthey. *Top. Catal.*, 2004, vol. 28, pp. 3–11.
18. Bowen, H.J.M. Environmental chemistry of the elements. London, Academic Press, 1979, 333 p.

## SPECIFIC FEATURES OF RARE-EARTH ELEMENT MIGRATION IN NATURAL AND TECHNOGENIC ECOLOGICAL SYSTEMS. THE CASE OF ALBYNSKOE GOLD DEPOSIT, THE AMUR REGION

V. I. Radomskaya\*, S. M. Radomskii\*, L. M. Pavlova\*, E. N. Kulik\*\*

*\*Institute of Geology and Nature Management, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences;  
per. Relochnyi 1, Blagoveshchensk, 675000 Russia. E-mail: radomskaya@ascnet.ru*

*\*\*Petropavlovsk JSC, ul. Lenina 140/1, Blagoveshchensk, 675000 Russia.  
E-mail: elenk70@mail.ru*

The article presents the data obtained by ISP-MS method on the content of rare-earth elements (REE) and their distribution in the parent rocks, soils and herbs in natural landscapes and in the area of Albynskoe gold deposit, the Amur region.

REE content in the Albynskoe deposit rocks ranges from 218.2 t (the average for the ore-bearing metasomatic rocks) to 161 g/t (for shale); the predominance of cerium group of lanthanides is noticed (Lan/Ybn varies from 1.51 to 23.5). Rare-earth mineralization as a part of ore-bearing rock is represented mainly by allanite and monazite. For the first time, the microprobe studies identified the rare-earth minerals as fluorbritholite, fluorbritholite-(Y) as parts of quartz-albite-chlorite-biotite metasomatic rocks.

The average REE content in ore field soils is 3–9 times higher than that in the background soils. The upper layers of the ore field soils in comparison with the parent rocks are totally REE depleted, with the amount of light lanthanum in soils being less than 42% on average, versus heavy lutetium being less by 2.4% only. The highest REE content in mine soils is registered for Ce (21–86 mg/kg), La (21–39 mg/kg), the lowest – for Lu (0.21–0.34 mg/kg). The content of the rare-earth compound forms in soils is studied. The exchange, complex, and specifically adsorbed forms referred to the mobile REE compounds as well as the inert (residual) fractions are specified. The residual REE fraction is predominant in the studied soils of Albynskoe ore deposit, being equal to 60–80% of the total content. The content of REE mobile forms in anthropogenic disturbed soils is found to be 3–13 times higher than that in background soils, with the highest concentrations of metals having been registered in the fraction represented by specific adsorbed forms.

It is revealed that the intensity of rare-earth element accumulation by plants is decreasing due to the increasing technogenic impact. According to the correlation analysis, no significant relationship is found out for REE between the amount of metals in herbs and the total content of mobile forms referred to the group of loosely bounded compounds in soils.

**Key words:** *rare-earth elements, fraction composition of soils, vegetation, accumulation coefficients, Albynskoe gold ore deposit.*