

Редкоземельные элементы в почвах и растениях луговых биоценозов

© 2021. Е. В. Дабах, к. б. н., доцент, с. н. с.,
Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: ecolab2@gmail.com

Изучалось содержание редкоземельных элементов (РЗЭ) в дерново-подзолистых супесчаных почвах водораздела и аллювиальных дерновых среднесуглинистых почвах поймы, а также в произрастающих на них растениях двух видов: *Dactylis glomerata* L. и *Cirsium arvense* (L.) Scop. в окрестностях промышленной зоны г. Кирово-Чепецка Кировской области. Показано, что содержание лантаноидов в обеих почвах невысокое, но в пойме оно в 3,0–4,3 раза выше, чем на водоразделе, Y и Sc – в 4,5 и 5,9 раза соответственно. В суглинистых почвах поймы при нормализации по хондриту проявляется отрицательная европиевая аномалия ($Eu^* = 0,78$). Содержание РЗЭ в растениях низкое, особенно на водоразделе, и коррелирует с общим их содержанием в почвах. Наиболее бедны РЗЭ *D. glomerata*. При общей тенденции к уменьшению коэффициента биологического поглощения (КБП) с увеличением атомной массы, выявлено, что *C. arvense* и, в меньшей степени, *D. glomerata* активнее поглощают из почвы La и Eu по сравнению с другими лёгкими лантаноидами. Кроме того, *D. glomerata* отличается высоким КБП Tb.

Ключевые слова: редкоземельные элементы, лантаноиды, дерново-подзолистые почвы, аллювиальные почвы, *Dactylis glomerata* L., *Cirsium arvense* (L.) Scop., пойма, водораздел.

Rare earth elements in soils and plants of meadow biocenoses

© 2021. E. V. Dabakh ORCID: 0000-0002-6088-4819
Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
e-mail: ecolab2@gmail.com

We studied the content of rare earth elements (REE) in soddy-podzolic sandy loam soils (Albeluvisols Umbric) of the watershed and alluvial soddy medium loamy soils (Fluvisols Umbric) of the floodplain, as well as in the meadow plants of two species growing on them: *Dactylis glomerata* L. and *Cirsium arvense* (L.) Scop. in the vicinity of the industrial zone of the city of Kirovo-Chepetsk, Kirov region. It was shown that the content of lanthanides in both soils is low, but in the floodplain it is 3–4.3 times higher than in the watershed, Y and Sc – 4.5 and 5.9 times, respectively. In the loamy soils of the floodplain, when normalized to chondrite, a negative europium anomaly ($Eu^* = 0.78$) appears. The content of REE in plants is low, especially in the watershed, and correlates with their total content in soils. *D. glomerata* is the poorest in REEs plant species. With a general trend towards a decrease in the biological absorption coefficient (BAC) with an increase in atomic mass, it was revealed that *C. arvense* and, to a lesser extent, *D. glomerata* absorb La and Eu from the soil more actively than other light lanthanides. In addition, *D. glomerata* has a high BAC in terbium.

Keywords: rare earth elements, lanthanides, Albeluvisols Umbric, Fluvisols Umbric, *Dactylis glomerata* L., *Cirsium arvense* (L.) Scop., floodplain, watershed.

Современные тенденции в изучении редкоземельных элементов (РЗЭ) в почвах и осадочных породах связаны с использованием их в качестве маркеров каких-либо экзогенных геологических [1, 2], почвенных процессов [1, 3, 4], их удобрительным эффектом [5], и возмож-

ным загрязнением техногенных ландшафтов в условиях возрастающей добычи и всё более активного применения РЗЭ в промышленности [6–8]. Во всех случаях необходимо иметь представление о нормальном содержании РЗЭ в почвах и произрастающих на них растениях.

В России, как и во всём мире, интерес к РЗЭ, в частности, к их распространению и поведению в почвах, распределению по профилю и в системе почва–растение возрастает [9–15]. Учитывая разнообразие ландшафтов на территории России, актуальность этих вопросов остаётся неизменной.

Цель настоящей работы – оценить содержание РЗЭ в почвах и растениях, распространённых на склоне водораздела и в пойме в окрестностях промышленного центра, а также выявить особенности, характерные для редкоземельного состава конкретного почвенного типа и вида растений.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования были почвы и растения, образцы которых отбирались в окрестностях г. Кирово-Чепецка Кировской области на сенокосном лугу на склоне водораздела и на заброшенном лугу в пойме р. Вятки.

На водоразделе распространены дерново-подзолистые супесчаные почвы на водноледниковых супесях, подстилаемых на глубине менее 60 см карбонатным элювием глин. В травостое разнотравно-злакового луга проективное покрытие злаков составляет 60%, разнотравья – 25%.

Почвы пойменного участка – аллювиальные дерновые зернистые среднесуглинистые на аллювии. В травостое крупнозлакового пойменного луга проективное покрытие злаков достигает 79%, разнотравья – 11%.

На обоих участках среди злаков доминирует ежа сборная (*Dactylis glomerata* L.), из разнотравья преобладает бодяк полевой (*Cirsium arvense* (L.) Scop.), распространение которого обусловлено нарушением поверхности луга при проведении сельскохозяйственных работ.

Смешанные образцы почв составлялись из индивидуальных проб, отобранных методом конверта.

Растения *C. arvense* и *D. glomerata* были собраны на пробных площадках размером 0,5 м × 0,5 м в конце вегетационного сезона (начало сентября) методом квадрата: отбирали пять образцов, состоящих из вегетативных побегов *D. glomerata*, отрастающих вторично, и генеративных побегов *C. arvense*.

Элементный состав растений и почв определяли методами масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (PQ-2, Elemental, Англия) и атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой

(ICAP-61, Thermo Jarrell Ash, США) в институте проблем технологии и микроэлектроники особо чистых материалов РАН (г. Черноголовка Московской области). Относительное стандартное отклонение для всех элементов не превышало 0,3 при измерении содержания этих элементов до пятикратного предела обнаружения (5 · ПО) и не превышало 0,15 при измерении содержания > 5 · ПО.

Свойства почв представлены в [16]. Показано, что по степени кислотности (pH_{KCl} 5,9) почвы на водоразделе относятся к категории «близкие к нейтральным», в пойме (pH_{KCl} 4,0) – «очень кислые». Более высокие значения pH в дерново-подзолистой почве обусловлены близким к поверхности подстилением карбонатных глин. Содержание органического вещества (2,84%) в почве на водоразделе соответствует типичным для дерново-подзолистых почв значениям, аллювиальные почвы богаты органическим веществом (7,58%). Содержание минеральных форм азота оценивается как очень низкое в почвах на водоразделе, как низкое – в пойме. При хорошей (от средней до повышенной) обеспеченности обеих почв обменным K, аллювиальные почвы очень бедны, а дерново-подзолистые богаты подвижным P.

Результаты и обсуждение

Содержание РЗЭ в почвах на трёх обследованных участках водораздела довольно близкое и составляет в среднем $50,7 \pm 3,8$ мг/кг (среднее значение ± стандартное отклонение), в том числе лантаноидов – $40,9 \pm 2,8$ мг/кг. Среднее содержание РЗЭ в почвах поймы (5 участков) составляет $187,7 \pm 11,3$ мг/кг, лантаноидов – $147,7 \pm 9,7$ мг/кг. Эти значения находятся в пределах диапазона концентраций, характерных для почв Европы [8, 17]. Концентрации РЗЭ в почвах непосредственно на участках отбора растительных образцов представлены в таблице. Содержание РЗЭ в аллювиальных почвах поймы р. Вятки и дерново-подзолистых почвах водораздела соответствует данным по аналогичным почвам бассейна р. Камы [13].

Нормализованное по хондриту (вещество каменных метеоритов) содержание лантаноидов в почвах представлено на рисунке 1. Картина распространения элементов в аллювиальных почвах поймы весьма сходна с элювием пермских глин [18], что, по-видимому, свидетельствует об участии этих пород в формировании левобережной поймы р. Вятки в районе г. Кирово-Чепецка. Значения характерной отрицательной европиевой аномалии (Eu*)

Таблица / Table

Содержание РЗЭ в почвах и растениях на водоразделе и в пойме (мг/кг)
REE content in soils and plants on the watershed and in the floodplain (mg/kg)

Элемент Element	Водораздел / Watershed			Пойма / Floodplain		
	дерново- подзолистая почва Albeluvisols Umbric	<i>Cirsium arvense</i>	<i>Dactylis glomerata</i>	аллювиальная дерновая почва Fluvisols Umbric	<i>Cirsium arvense</i>	<i>Dactylis glomerata</i>
La	9,1	0,20	0,032	27	0,38	0,076
Ce	19,1	0,26	0,051	59,6	0,45	0,11
Pr	2	0,032	0,005	6,4	0,059	0,012
Nd	7,4	0,11	0,021	24,5	0,22	0,045
Sm	1,4	0,016	0,0033	5	0,040	0,0082
Eu	0,34	0,0047	< 0,002	1,2	0,017	0,0038
Gd	1,1	0,013	< 0,003	4,4	0,040	0,0082
Tb	0,17	< 0,003	< 0,003	0,65	0,0046	< 0,003
Dy	1	0,0082	< 0,002	4,3	0,026	0,0057
Ho	0,19	0,0012	< 0,0006	0,82	0,0051	0,0012
Er	0,59	0,0035	< 0,0006	2,2	0,013	0,0025
Tm	0,092	< 0,0005	< 0,0005	0,3	0,0011	< 0,0005
Yb	0,67	0,0036	< 0,001	2,2	0,0069	0,0022
Lu	0,09	0,0006	0,0003	0,32	0,0011	0,0006
Суммарное содержание лантаноидов Total content of lanthanides	43,24	н. о. n. d.	н. о. n. d.	138,89	н. о. n. d.	н. о. n. d.
Sc	3,7	0,061	< 0,05	16	0,052	< 0,05
Y	5,4	0,048	0,011	24,8	0,17	0,039
Суммарное содержание РЗЭ Total content of REE	52,34	н. о. n. d.	н. о. n. d.	176,69	н. о. n. d.	н. о. n. d.

Примечание: н. о. – не определено / Note: n. d. – not defined.

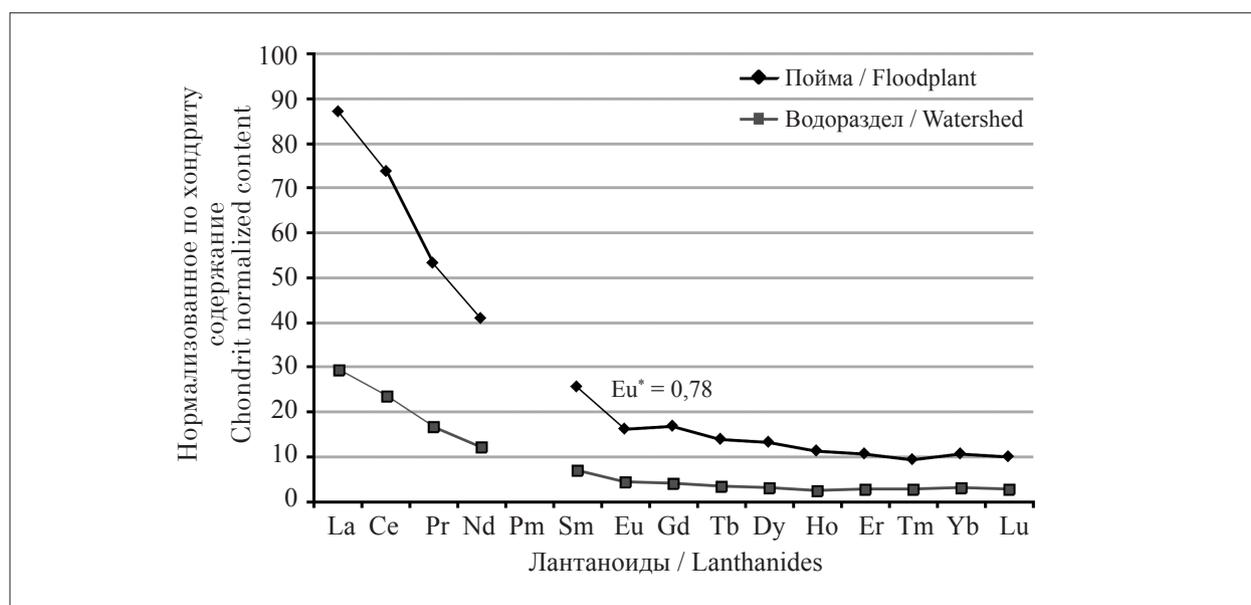


Рис. 1. Нормализованное по хондриту содержание лантаноидов в почвах поймы и водораздела
Fig. 1. Chondrite-normalized content of lanthanides in the soils of the floodplain and watershed

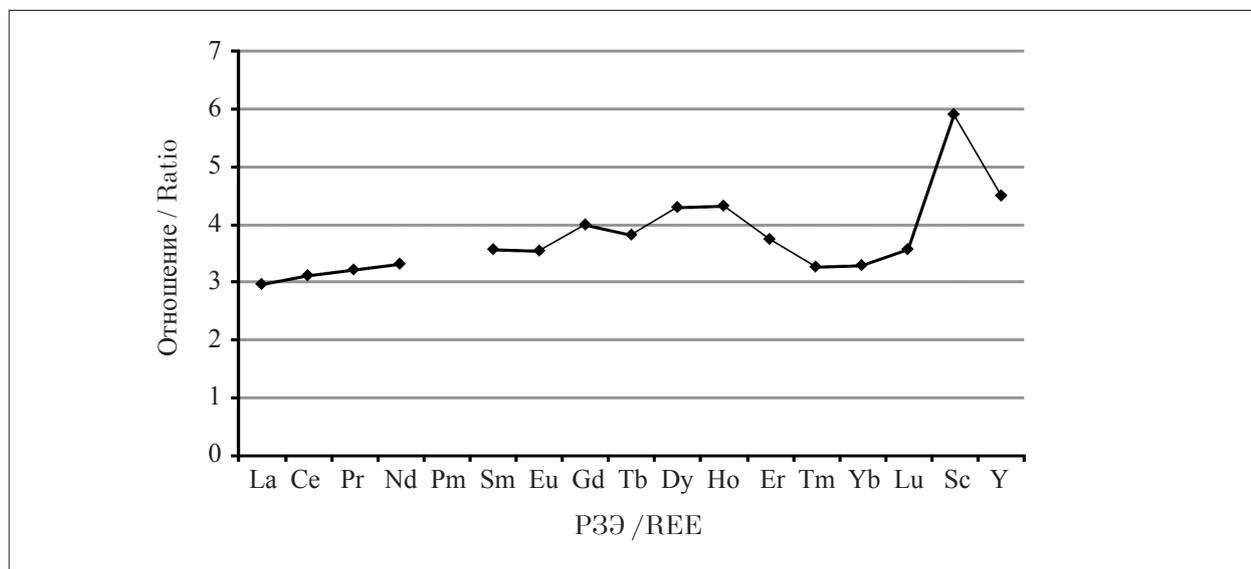


Рис. 2. Соотношение PЗЭ в почвах поймы и водораздела
Fig 2. The ratio of REE in the soils of the floodplain and watershed

составляют 0,66 в глинах и 0,78 – в пойменной почве. Подобная аномалия, обусловленная, вероятно, зависимостью поведения элемента от окислительно-восстановительных условий, отмечалась ранее для почв межгрядного понижения на этом участке поймы р. Вятки [18].

Отношение содержания лантаноидов в почвах поймы и водораздела составляет от 3 до 4,3, Y и Sc – 4,5 и 5,9 соответственно (рис. 2). Оно несколько выше для тяжёлых лантаноидов от Gd до Er. Согласно литературным данным лёгкие лантаноиды выщелачиваются полнее, чем тяжёлые. Вероятно, лёгкие лантаноиды входят в состав менее устойчивых минералов, чем тяжёлые [9]. В глинистых почвах по сравнению с песчаными обычно выше содержание лёгких PЗЭ, так как тяжёлые PЗЭ ассоциируются с более устойчивыми к выветриванию минералами, сосредоточенными в крупных фракциях [19]. При более тяжёлом среднесуглинистом составе пойменных почв по сравнению с супесчаными почвами водораздела следовало бы ожидать иное распределение отношений PЗЭ. Можно предположить, что это несоответствие распространения лёгких и тяжёлых PЗЭ в почвах разного гранулометрического состава обусловлено такими преимущественными факторами как минералогический состав и, главным образом, содержание органического вещества. Почвы пойм богаче силикатными соединениями Fe, Al и Mn, увеличивающими поглотительную способность почв, в том числе, в отношении PЗЭ. Кроме того, было доказано, что независимо от типа почв, PЗЭ ассоциируются главным

образом с органическим веществом (которого в пойме в 3 раза больше), образуя металлоорганические комплексы, что влияет на поведение элементов в системе почва–растение [13].

Возможно, за счёт того, что тяжёлые лантаноиды образуют более прочные комплексы с органическими лигандами, чем лёгкие, и ими обогащены растворимые фракции [20], в условиях нисходящей миграции растворов на водоразделе происходит относительное обеднение ими корнеобитаемой толщи по сравнению с поймой.

Содержание PЗЭ в растениях *C. arvense* и *D. glomerata* на дерново-подзолистых и аллювиальных почвах низкое – ниже значений, приводимых для *Agrostis capillaris*, относящейся также, как и *D. glomerata*, к семейству злаковые, произрастающей на камбисолах [21]. Концентрации элементов существенно различаются в зависимости от вида растения и местоположения участка.

Полученные результаты соответствуют обобщённым литературным данным, согласно которым содержание лантаноидов в растениях значительно варьирует, и разные виды растений, произрастающие на одном и том же месте, поглощают различные PЗЭ в непостоянных соотношениях [15].

На более бедных и менее кислых почвах водораздела содержание лантаноидов в растениях значительно ниже, чем в пойме (табл.). Независимо от типа ландшафта *C. arvense* накапливает большее количество PЗЭ по сравнению с *D. glomerata*. Благодаря более высокой подвижности в почвах, лёгкие PЗЭ активнее

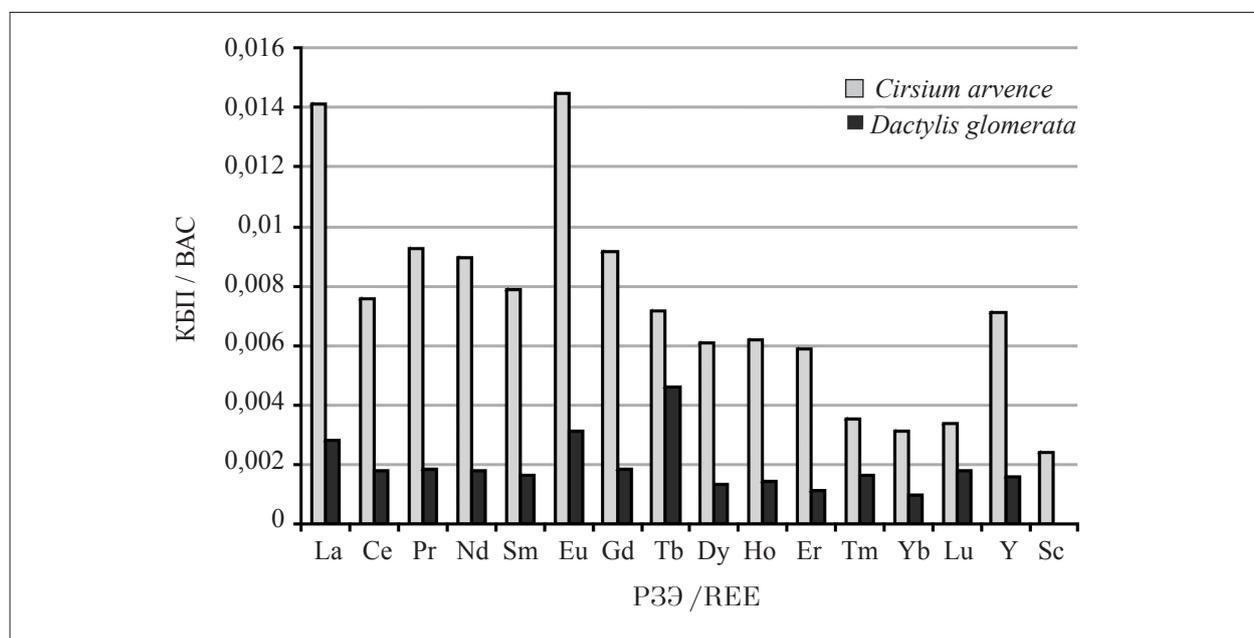


Рис. 3. Коэффициенты биологического поглощения (КБП) РЗЭ растениями в пойме
 Fig. 3. Biological absorption coefficients (BAC) of REE by plants in the floodplain

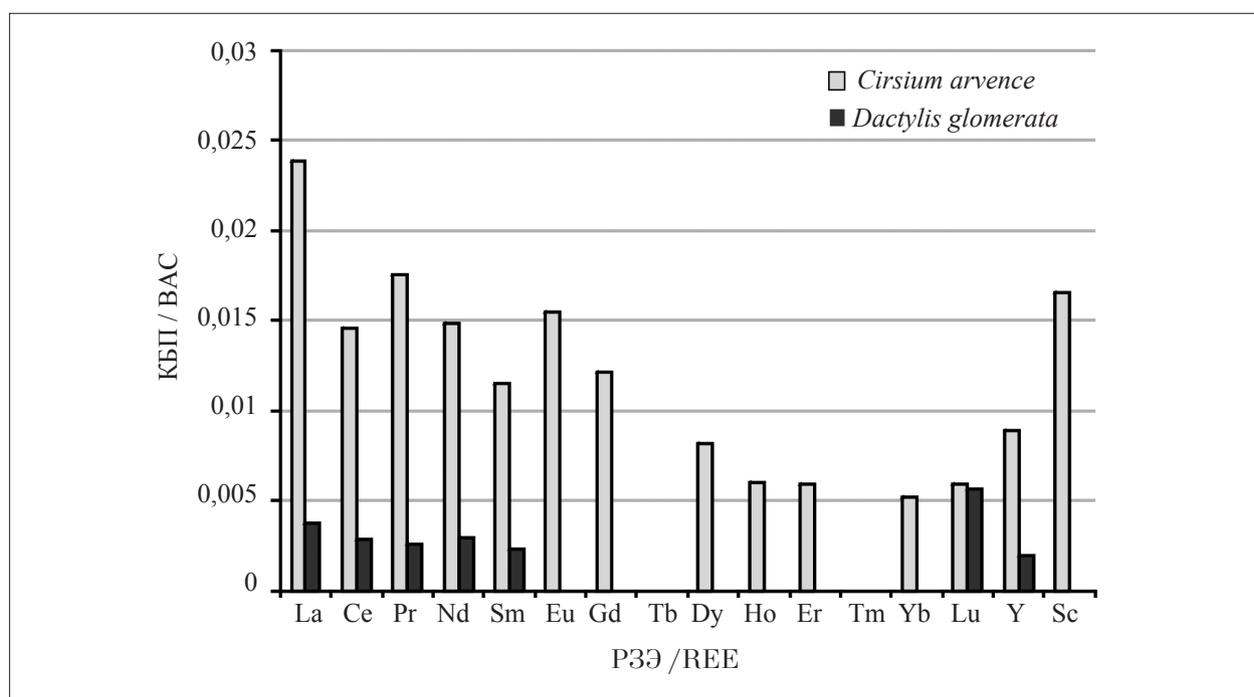


Рис. 4. Коэффициенты биологического поглощения РЗЭ растениями на водоразделе
 Fig. 4. Biological absorption coefficients (BAC) of REE by plants in the watershed

поглощаются растениями, обеспечивая более высокие концентрации их в тканях растений по сравнению с тяжёлыми РЗЭ [8].

Коэффициенты биологического поглощения (КБП) РЗЭ (концентрации в растениях нормализованы по валовому содержанию элементов в почвах) очень низкие, составляют от сотых до тысячных долей для обоих видов растений. В *C. arvense* они выше, чем в *D. glom-*

erata (рис. 3, 4). По [22] отношение содержания РЗЭ в растениях к содержанию в почвах составляет от 0,04 до 0,09. В [23] приводятся данные разных авторов, согласно которым КБП РЗЭ указывается в пределах от 0,003 до 0,20 (20%). Полагают, что растения, содержащие значительно меньшие количества РЗЭ по сравнению с почвами, выполняют барьерную функцию в пищевой цепи, препятствуя пере-

носу РЗЭ из почвы в организмы животных и человека [24], причём при поглощении из почвы (в отличие от аэрогенного поступления элементов) максимальное накопление РЗЭ отмечено в корнях растений [25]. Следует отметить, что при меньшей концентрации РЗЭ в почвах и растениях на водоразделе КБП выше. При общей тенденции к уменьшению КБП с увеличением атомной массы, выявлено, что *C. arvense* и, в меньшей степени, *D. glomerata* более активно поглощают из почвы лантан и европий по сравнению с другими лёгкими лантаноидами (рис. 3). Кроме того, *D. glomerata* отличается высоким КБП тербия. Соизмеримые нормализованные концентрации и повышенное содержание тербия характерны для ели обыкновенной (*Picea abies*), однако в изученных луговых травах не проявляется цериевая аномалия, выявленная для хвои *Picea abies* и листьев *Rubus fruticosus* [26].

Коэффициенты корреляции между содержанием лантаноидов в растениях *C. arvense* и в почве довольно высокие: на водоразделе 0,97, в пойме 0,95, что несколько противоречит литературным данным, согласно которым поглощение РЗЭ коррелирует с концентрациями легко растворимых соединений и редко хорошо коррелирует с их общими концентрациями в почвах [22]. Как в растениях *C. arvense*, так и в почвах в условиях поймы происходит относительное накопление средних членов ряда

лантаноидов – от Eu до Er (рис. 5). Вследствие очень низкого содержания тяжёлых РЗЭ в растениях *D. glomerata* на водоразделе (ниже ПО метода) подобный вывод невозможно сделать в отношении этого представителя семейства злаковые.

Несмотря на то, что Y и Sc объединяют с лантаноидами в одну группу РЗЭ, в литературе отмечены некоторые особенности их поведения в почвах [14] и растениях [23]. Согласно нашим данным, в отличие от других элементов, скандий в растениях *C. arvense* на водоразделе накапливается в больших количествах, чем в пойме. Подобную закономерность отмечали для ряда эссенциальных микроэлементов – Cu, Zn, B, Mo [16].

Выводы

1. Содержание РЗЭ в окрестностях химических предприятий г. Кирово-Чепецка невысокое, соответствует диапазону средних концентраций в почвах разных регионов мира. В супесчаных дерново-подзолистых почвах на склоне водораздела содержание лантаноидов в 3–4,3 раза ниже, чем в среднесуглинистых аллювиальных дерновых почвах поймы. Для Y и Sc это отношение больше – 4,5 и 5,9 соответственно.

2. Нормализованное по хондриту содержание лантаноидов в аллювиальных почвах

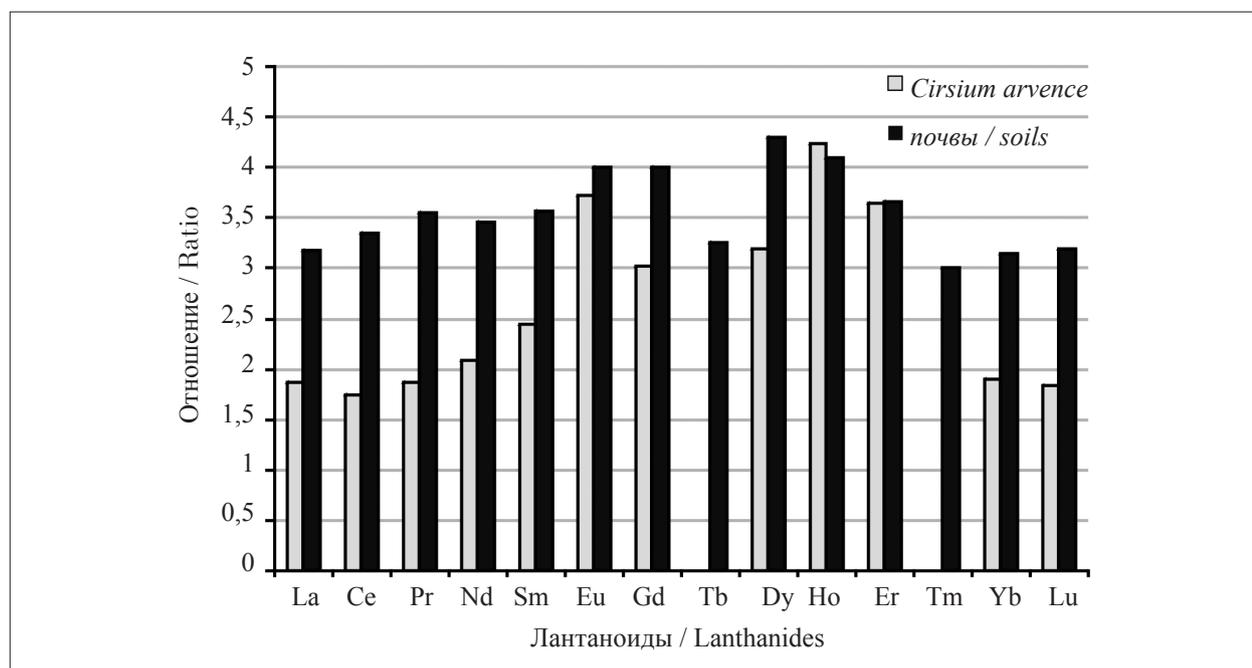


Рис. 5. Отношение содержания лантаноидов в почвах и в растениях *C. arvense* в пойме к их содержанию на водоразделе
 Fig. 5. The ratio of the content of lanthanides in soils and in *C. arvense* plants in the floodplain to their content in the watershed

характеризуется отрицательной европиевой аномалией $Eu^* = 0,78$. Подобная аномалия ранее была отмечена в элювии пермских глин, широко распространённых на территории Предуралья.

2. На более бедных и менее кислых почвах водораздела содержание лантаноидов в растениях двух видов значительно ниже, чем в пойме. Независимо от типа ландшафта *C. arvense* накапливает большее количество РЗЭ по сравнению с *D. glomerata*.

3. Коэффициенты корреляции между содержанием лантаноидов в растениях *C. arvense* и в почве довольно высокие: на водоразделе 0,97, в пойме – 0,95.

4. Коэффициенты биологического поглощения РЗЭ очень низкие, составляют от сотых до тысячных долей для обоих видов растений. При меньшей концентрации РЗЭ в почвах и растениях на водоразделе КБП лантаноидов выше. *Cirsium arvense* и в меньшей степени *D. glomerata* более активно поглощают из почвы La и Eu по сравнению с другими лантаноидами. Кроме того, *D. glomerata* отличается высоким КБП тербия.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УРО РАН по теме «Оценка и прогноз отсроченного техногенного воздействия на природные и трансформированные экосистемы подзоны южной тайги» № 0414-2018-0003.

References

1. Wen X.-Y., Huang Ch.-M., Tang Y., Gong-Bo S.-L., Hu X.-X., Wang Z.-W. Rare earth elements: a potential proxy for identifying the lacustrine sediment source and soil erosion intensity in karst areas // J Soils Sediments. 2014. V. 14. P. 1693–1702. doi: 10.1007/s11368-014-0928-y

2. Yu R., Lin C., Yan Y., Hu G., Huang H., Wang X. Distribution and provenance implication of rare earth elements and Sr-Nd isotopes in surface sediments of Jiulong River, Southeast China // J. Soils Sediments. 2019. V. 19. P. 1499–1510. doi: 10.1007/s11368-018-2135-8

3. Liu G., Xiao H., Liu P., Zhang Q., Zhang J. An improved method for tracing soil erosion using rare earth elements // J. Soils Sediments. 2016. V. 16. P. 1670–1679. doi: 10.1007/s11368-016-1356-y

4. Liu S., Guo Z.C., Halder M., Zhang H.X., Six J., Peng X.H. Impacts of residue quality and soil texture on soil aggregation pathways by using rare earth oxides as tracers // Geoderma. 2021. V. 399. Article No. 115114. doi: 10.1016/j.geoderma.2021.115114

5. Pang X., Li D., Peng A. Application of rare-earth elements in the agriculture of China and its environmental

behavior in soil // J. Soils Sediments. 2001. V. 1 (2). Article No. 124. doi: 10.1007/BF02987718

6. Ladonin D.V. Lanthanides in the soils of the impact zone of the Cherepovets Metallurgical Plant // Pochvovedenie. 2017. No. 6. P. 680–689 (in Russian).

7. Saiano F., Scalenghe R. Soil REE patterns as tracers of the emplacement of metal-rich anthropogenic materials. A case study in Moa (Cuba) // J. Soils and Sediments. 2019. V. 19. P. 2777–2784. doi: 10.1007/s11368-019-02283-w

8. Ramos S.J., Dinali G.S., Oliveira C., Martins G.C., Moreira C.G., Siqueira J.O., Guilherme L.R.G. Rare Earth elements in the soil environment // Curr Pollution Rep. 2016. V. 2. P. 28–50. doi:10.1007/s40726-016-0026-4

9. Vodyanitskiy Yu.N. Geochemical fractionation of lanthanides in soils and rocks (literature review) // Pochvovedenie. 2012. No. 1. P. 69–81 (in Russian).

10. Vodyanitskiy Yu.N., Rogova O.B. Biogeochemistry of lanthanides in soils // Byulleten Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva. 2016. V. 84. P. 101–118 (in Russian).

11. Perelomov L.V., Asainova Zh.S., Yoshida S., Ivanov I.V. The content of rare earth elements in the soils of the Prioksko-Terrasny Biosphere Reserve // Pochvovedenie. 2012. No. 10. P. 1115–1126 (in Russian).

12. Alekseenko V.A. Rare chemical elements in soils of landscapes of the southern European part of Russia // Modern problems of soil pollution. III Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya. Moskva: MGU, 2010. P. 20–26 (in Russian).

13. Fedotov P.S., Rogova O.B., Dzhendloda R.Kh., Karandashev V.K. Metal-organic complexes as a major sink for rare earth elements in soils // Environmental Chemistry. 2019. V. 16. No. 5. P. 323–332. doi: 10.1071/EN18275

14. Ladonin D.V. Comparative assessment of adsorption of rare earth elements by some types of soils // Pochvovedenie. 2019. No. 10. P. 1163–1171 (in Russian). doi: 10.1134/S0032180X1910006X

15. Kotelnikova A.D., Rogova O.B., Stolbova V.V. Lanthanides in soil: intake, content, effect on plants, genotoxicity (review of current assessments) // Pochvovedenie. 2021. No. 1. P. 100–119 (in Russian). doi: 10.31857/S0032180X21010056

16. Dabakh E.V., Kislitsina A.P., Domnina E.A. Comparative study of the content of trace elements in the system soil – plants of meadow biocenoses // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 1. P. 139–146 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-1-139-146

17. Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants. Fourth edition. CRC Press, 2010. P. 147–157.

18. Dabakh E.V. Rare earth elements in soil of natural and technogenic landscapes of Kirov region // Theoretical and Applied Ecology. 2016. No. 3. P. 56–67 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2016-3-068-075

19. Ayres M., Harris N. REE fractionation and Nd-isotope disequilibrium during crustal anatexis: constraints

from Himalayan leucogranites // *Chem Geol.* 1997. V. 139. P. 249–269.

20. Elderfield H., Upstillgoddard R., Sholkovitz E.R. The rare-earth elements in rivers, estuaries, and coastal seas and their significance to the composition of ocean waters // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1990. V. 54. P. 971–991.

21. Tyler G., Olsson T. Plant uptake of major and minor elements as influenced by soil acidity and liming // *Plant Soil.* 2001. No. 230. P. 307–321.

22. Tyler G. Rare earth elements in soil and plant systems — a review // *Plant and Soil.* 2004. V. 267. P. 191–206.

23. Kastori R.R., Maksimovi I.V., Zeremski-Škori T.M., Putnik-Deli M.I. Rare earth elements-yttrium and higher plants // *Zbornik Matice srpske za prirodne nauke / Proc. Nat. Sci, Matice Srpska Novi Sad.* 2010. No. 118. P. 87–98. doi: 10.2298/ZMSPN1018087K

24. Wen B., Yuan D.A., Shan X.Q., Li F.L., Zhang S.Z. The influence of rare earth element fertilizer application on the distribution and bioaccumulation of rare earth elements in plants under field conditions // *Chem. Speciat. Bioavailab.* 2001. V. 13. No. 2. P. 39–48. doi: 10.3184/095422901783726825

25. Brioschi L., Steinmann M., Lucot E., Pierret M.C., Stille P., Prunier J., Bado P.M. Transfer of rare earth elements (REE) from natural soil to plant systems: implications for the environmental availability of antropogenic REE. *Plant Soil.* 2013. V. 336. P. 143–163. doi: 10.1007/s11104-012-1407-0

26. Wyttenbach A., Tobler L., Schleppe P., Furrer V. Variation of the rare earth element concentrations in the soil, soil extract and in individual plants from the same site // *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 1998. V. 231. No. 1–2. P. 101–106. doi: 10.1007/BF02388013