

УДК 574.2/550.42/550.74(282.256.341)

ДЕФИЦИТ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В КОМПОНЕНТАХ ПРИРОДНОГО ЛАНДШАФТА КАК ПРИЧИНА ГЕОФАГИИ СРЕДИ КОПЫТНЫХ НА О. ОЛЬХОН

© 2023 г. А. М. Паничев^{1,*}, Н. В. Барановская², И. Ю. Чекрыжов³, И. В. Серёдкин¹, В. В. Иванов³, Е. А. Вах³, Е. В. Еловский³

Представлено академиком РАН П. Я. Баклановым 22.03.2023 г.

Поступило 22.03.2023 г.

После доработки 14.04.2023 г.

Принято к публикации 25.04.2023 г.

Актуальность работы заключается в системном изучении причин феномена геофагии. Из оригинальных результатов комплексных геолого-гидробиогеохимических исследований, проведенных на острове Ольхон (оз. Байкал), следует, что геофагия среди диких и домашних копытных на острове обусловлена дефицитом редкоземельных элементов легкой подгруппы (ЛРЗЭ) в растительных кормах и природных водах как отражение их низких содержаний в неоген-четвертичных рыхлых накоплениях (делювий—элювий) и почвах, развитых на древних терригенно-карбонатных метаморфитах, бедных редкоземельными элементами. Подобная геохимическая специфика ландшафтов способна быть причиной разбалансировки ЛРЗЭ в гормональной системе организма. Гормональный стресс заставляет животных регулярно-периодически потреблять каолиновые глины кор выветривания, обогащенных нужными элементами.

Ключевые слова: геофагия, копытные, редкоземельные элементы, геология, биогеохимия, о. Ольхон

DOI: 10.31857/S2686739723600558, **EDN:** WFKDYO

Во многих регионах мира среди некоторых групп животных распространено активное потребление минеральных грунтов. Этот феномен в англоязычной научной литературе обозначается термином “геофагия”. В 2015 г. у нас созрела идея, что одна из главных причин стремления к геофагии может быть вызвана нарушениями в организме баланса (отклонениями от нормы в сторону избытка или в сторону недостатка) определенных редкоземельных элементов (РЗЭ) [1]. При этом мы исходили из предположения, что нервная, эндокринная и иммунная системы, т.е., по сути, главные органы управления и защиты у всех позвоночных построены в значительной мере на уникальных физико-химических свойствах f-электронных атомов РЗЭ. Роль таких атомов, судя по имеющимся данным [2, 3], определяется

воздействиями на ионотропные рецепторы. Справедливость РЗЭ-гипотезы доказывают результаты полученных нами комплексных исследований в 2020 г. в Сихотэ-Алине [4] и в 2021 г. в Горном Алтае [5]. Выявлено, что на территориях, где имеют место массовые случаи геофагии среди диких и домашних копытных, распространены горные породы, обогащенные первичными акцессорными минералами РЗЭ, за счет которых в процессе выветривания формируются вторичные легкорастворимые минералы (редкоземельные водные фосфаты, карбонаты и фторкарбонаты), которые аккумулируют почвы. В итоге происходит накопление РЗЭ в поверхностных водах, растительности и в тканях растительноядных животных, в том числе относящихся к нервной и гормональной системам. Избыток некоторых РЗЭ в нейроиммуноэндокринной системе организма вызывает разбалансировку ее работы, что сопровождается гормональным стрессом. Было установлено также, что потребляемые животными минеральные сорбенты, перемещаясь по пищеварительному тракту, способны поглощать избыточное количество РЗЭ и выводить их из организма. В итоге сделан вывод, что гормональный стресс заставляет животных искать минеральные

¹Тихоокеанский институт географии
Дальневосточного отделения Российской академии наук,
Владивосток, Россия

²Томский политехнический университет, Томск, Россия

³Дальневосточный геологический институт
Дальневосточного отделения Российской академии наук,
Владивосток, Россия

*E-mail: sikhote@mail.ru

сорбенты, чтобы нивелировать дисбаланс РЗЭ в организме.

В русле дальнейшего развития РЗЭ-гипотезы в 2022 г. аналогичные системные исследования мы осуществили в районе озера Байкал, где местному населению издавна известны массовые случаи геофагии среди диких копытных. Одним из объектов для полевого изучения интересующего нас феномена на Байкале был выбран остров Ольхон.

На большей части территории острова (около 75% площади) распространены метаморфизированные до амфиболитовой фации терригенно-карбонатные породы (кристаллосланцы, амфиболиты, гнейсы и мраморы) протерозойского возраста. Около 15% территории занято мигматитами гранитоидного ряда. Остальная часть покрыта мощным чехлом неогеновых и четвертичных рыхлых отложений. Все фоновые породы территории, и, особенно элювиально-делювиальные отложения по ним, отличаются существенно пониженными, относительно североамериканского сланца NASC, содержаниями РЗЭ, особенно легкой подгруппы. Наиболее высокие содержания РЗЭ выявлены в некоторых типах гранитоидных мигматитов и в глинистых корах выветривания по таким породам. Такие обогащенные РЗЭ глины (кудуриты) в ряде мест на острове регулярно-периодически потребляют дикие и домашние копытные. В минеральном составе таких кудуритов, по данным количественного рентгенофазового исследования 9 проб, преобладает каолинит (59–95%), в составе примесей – оксиды железа (до 10%) и кварц (до 6%).

В результате автоматизированного поиска на аналитическом электронном микроскопе (SEM-EDS) минеральных РЗЭ-фаз в кудуритах, как и в пробах глинистых экскрементов животных (копролитах), выявлена группа фосфатов: рабдофан, монацит и ксенотим, а также РЗЭ-крандаллит – гидратированный алюмофосфат Са, Ва и Sr с примесью Fe и РЗЭ, который характерен для вторичных минеральных комплексов почв и подпочвенных горизонтов на обогащенных РЗЭ алюмосиликатных породах в условиях влажного тропического климата [7]. На территориях умеренных широт он встречается в древних (мел-палеогеновых) корах выветривания по гранитоидам и другим типам горных пород [8]. В пробах фоновых пород острова (амфиболитовые кристаллосланцы и терригенно-карбонатные породы) РЗЭ-содержащие минеральные фазы обнаружены в виде весьма редких тонких вкрапленников.

В 14 пробах почв, отобранных на фоновых породах (терригенно-карбонатные и амфиболитовые сланцы), сумма REE (с Y и Sc) варьирует от 13.20 до 67.77 ppm (среднее – 43.85). Этот показатель, по данным [6], в 2–3 раза меньше средних

значений сумм REE по почвам Бразилии, Японии, Китая, Швеции и ряда стран Европы.

Из-за сухости климата на Ольхоне (менее 300 мм осадков) и в связи с длительным периодом отсутствия дождей во время полевых работ гидрохимические пробы удалось отобрать лишь из 3 ручьев и одну пробу из озера у пос. Узурь. По степени минерализации все воды пресные (до 0.5 г/л); по химсоставу – сульфат-гидрокарбонатно-магний-кальциевые; pH их меняется от 7.65 до 8.11. Воды оказались очень схожи между собой по уровню содержания большинства микроэлементов с колебанием в пределах менее одного порядка. Различия в пределах одного порядка фиксируются лишь по Р, Мо и V. Сумма растворенных форм РЗЭ изменяется (с учетом Sc и Y) от 0.12 до 0.16 ppb. Это на порядок меньше, чем в водах большинства рек мира (по [9]) и на несколько порядков – чем в речных водах в районах массовой геофагии в Сихотэ-Алине [4].

Суммы РЗЭ в пробах осок, произрастающих на высококарбонатных породах ($n = 4$), варьируют, в расчете на сухое вещество, от 0.054 до 0.127 ppm (среднее – 0.093); на амфиболитовых кристаллосланцах ($n = 3$) – от 0.179 до 0.235 (0.200) ppm.

Результаты определения концентраций макроэлементов в воздушно-сухих пробах осок (*Carex* spp.) с о. Ольхон свидетельствуют о том, что большая часть территории недостаточно обеспечена Na и достаточно остальными биофильными элементами. Максимальное содержание Na в осоках (до 1 г/кг, что близко к показателю в люцерновом сене) выявлено только в пробе с прибрежной части соленого озера Шара-Нур (район, близкий к центральной части острова). Средняя величина содержания Na в осоках по остальной территории на порядок меньше. Такая неравномерная обеспеченность территории острова натрием оказывает влияние на распределение по ней диких оленей (*Cervus elaphus xanthopygus*), численность которых на острове около 150 голов. Около 2/3 от всех зарегистрированных сотрудниками Прибайкальского национального парка встреч оленей на острове в зимний и летний периоды отмечены в районе соленого озера Шара-Нур. Эти же биологи отмечают находки на острове не полностью окостеневших сброшенных рогов взрослыми оленями, частично покрытых толстым слоем кожи.

На материале сравнения макро- и микроэлементного состава химически идентичных семи пар кудуритов и копролитов установлено, что только Na и ЛРЗЭ претендуют на роль искоемых животными в глинах на Ольхоне. Типовой диверсионный профиль представлен на рис. 1. Аналогичная закономерность получена при сопоставлении кислотных (HCl, pH=1) вытяжек из тех же парных проб. Типичный результат представлен

на одной из диаграмм (рис. 2). Из нее очевидно, что к РЗЭ, способным извлекаться из кудуритов в пищеварительном тракте животных, относятся Sc, La, Ce, Pr, Nd, Sm и Y.

Дефицит редкоземельных элементов в ландшафтных компонентах на Ольхоне хорошо иллюстрируют графики профилей содержаний РЗЭ в хвостовых железах оленей из района с избытком РЗЭ в Горном Алтае (рис. 3, профиль 1 и 2) и оленя с Ольхона (профиль 3).

В последние десятилетия активно нарастает интерес к применению РЗЭ-содержащих добавок при откорме различных животных. В то же время ряд исследователей [10, 11] показали, что в желудочно-кишечном тракте всасывается лишь малая доля минеральных форм РЗЭ, принимаемых перорально. Несмотря на это, в связи с очевидными эрготропными эффектами РЗЭ-подкормок в виде существенного увеличения прироста массы тела и улучшения ассимиляции корма, а также фактов влияния таких добавок на активность ферментов и гормонов (в том числе щитовидной железы и эпифиза), а также на изменение других параметров крови и межклеточных жидкостей ряд исследователей [12, 13] склонны считать, что даже низкие дозы РЗЭ, попадающие в кровь, могут вызывать ощутимые биоэффекты. Довольно обширный перечень уже выявленных биоэффектов от РЗЭ-подкормок приводят китайские специалисты [14]. В этом перечне, в зависимости от дозы РЗЭ-подкормок, может наблюдаться либо стимулирование, либо ингибирование показателей. Будь это рост организма, пролиферация клеток, апоптоз; антиоксидантная или прооксидантная активность; стабилизация или дестабилизация цитоскелета; повышение или подавление проницаемости клеток; положительная или отрицательная регуляция клеточной сигнальной системы; усиление минерализации или деминерализация скелета. Указанные показатели подтверждают возможность возникновения проблем со здоровьем у животных, в том числе нарушений минерального обмена при обитании в ландшафтах как с избытком, так и с недостатком в кормах, необходимых для организма редкоземельных элементов.

Из приведенного краткого обзора вполне очевидно, что у специалистов значимость физиологических эффектов в организме даже малых доз РЗЭ не вызывает сомнений. Вопрос усвоения организмом РЗЭ также решается позитивно. На основании всего объема выполненных исследований мы считаем возможным существование у птиц и млекопитающих (возможно, у всех позвоночных) способности не только ощущать гормональный стресс, вызванный разбалансировкой РЗЭ в нейроиммуноэндокринной системе, животные могут быть наделены также способностью

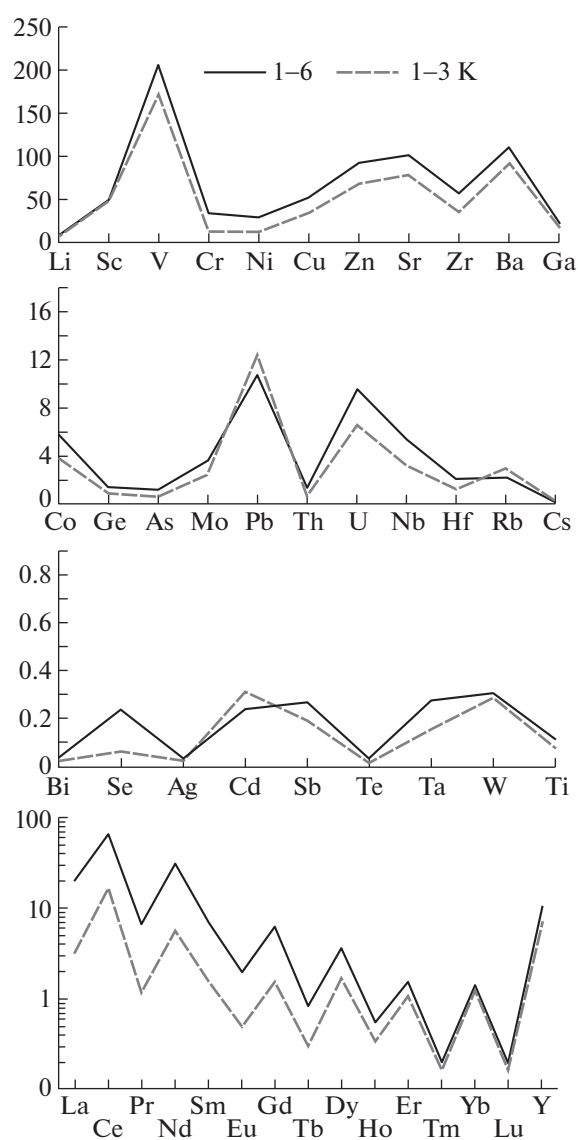


Рис. 1. Типовые дивариантные профили содержаний (ppm) микроэлементов в кудурите (сплошная линия проба 1–6) и в копролитах (пунктирная линия проба 1–3К).

“чувствовать” какие-то определенные формы РЗЭ в различных природных веществах (включая минеральные) и восполнять за счет них недостаток элементов в организме. В случае накопления в организме избыточных количеств РЗЭ животные инстинктивно способны избавляться от них, потребляя минеральные сорбенты. Такой механизм поддержания устойчивости главной управляющей и защитной системы организма мог быть выработан только в процессе биологической эволюции. Как очевидно, стремление к восстановлению нормального функционирования нейроиммуноэндокринной системы наиболее сильно должно проявляться у молодых животных в периоды активного роста организма, у самок в перио-

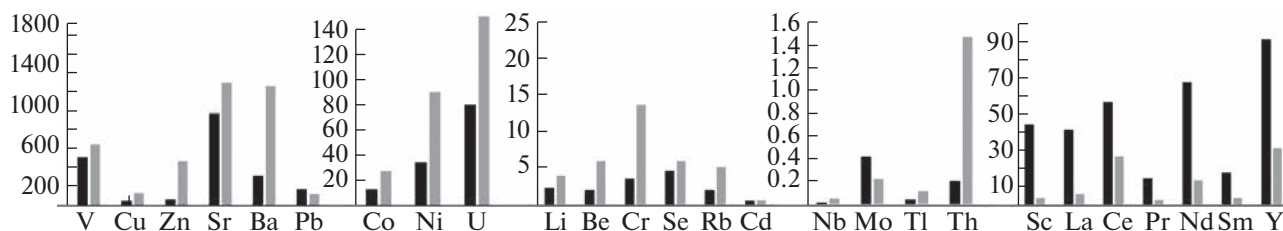


Рис. 2. Диаграммы концентраций микроэлементов в супернатантах (в мкг/л) после вытяжек: темный столбик — из кудуры; светлый — из копролита (пробы те же).

ды вынашивания плода, у самцов после гона, когда значительная доля РЗЭ расходуется со спермой. Наконец, это особо важно для всех животных в состоянии некоторых заболеваний, в том числе из-за нарушений в составе пищеварительной микрофлоры. Приведенный перечень явлений охватывает практически все известные случаи геофагии, отображенные в обширной научной литературе по данной проблеме.

Таким образом, геолого-гидробиогеохимические исследования, проведенные нами на Ольхоне, позволяют констатировать, что геофагия среди животных на территории острова развивается в условиях сухого климата в горно-таежных с остепненными участками ландшафтах преимущественно на древних метаморфических породах терригенно-карбонатной формации с присутствием в них малых количеств гипогенных РЗЭ-содержащих минералов. Это обстоятельство определяет низкие содержания вторичных минеральных фаз РЗЭ в элювии-делювии, а также растворимых форм РЗЭ в производных от них почвах и, соответственно в природных водах и кормовой растительности. Такая специфика геохимии ландшафта, как и выявленная ранее в Сихотэ-

Алине и в Горном Алтае специфика с избыточно высоким содержанием РЗЭ в природных компонентах, предопределяет условия для нарушений в нейроиммунноэндокринной системе, являющейся носителем легкой группы редкоземельных элементов у растительноядных животных, вызывая ответную стресс-реакцию организма. Гормональный стресс заставляет животных компенсировать возникший элементный дисбаланс в организме путем потребления минеральных сорбентов, обогащенных нужными РЗЭ. Очень похоже, что обозначенная нами РЗЭ-причина геофагии охватывает более значимую часть случаев во всем мире, чем принято считать.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено при поддержке грантов РНФ (№ 20-67-47005 и 20-64-47021).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Panichev A.M.* Rare Earth Elements: Review of Medical and Biological Properties and Their Abundance in the Rock Materials and Mineralized Spring Waters in the Context of Animal and Human Geophagia Reasons Evaluation // *Achievements in the Life Sciences*. 2015. V. 9. P. 95–103. <https://doi.org/10.1016/j.als.2015.12.001>
2. *Powis D.A., Clark C.L., O'Brien K.J.* Lanthanum can be transported by the sodium-calcium exchange pathway and directly triggers catecholamine release from bovine chromaffin cells // *Cell Calcium*. 1994. V. 16. № 5. P. 377–390.
3. *Palasz A., Czekaj P.* Toxicological and cytophysiological aspects of lanthanides action // *Acta Biochimica Polonica*. 2000, V. 47. № 4. P. 1107–1114.
4. *Panichev A.M., Baranovskaya N.V., Seryodkin I.V., et al.* Landscape REE anomalies and the cause of geophagy in wild animals at kudurs (mineral salt licks) in the Sikhote-Alin (Primorsky Krai, Russia) // *Environmental Geochemistry and Health*. 2021. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-01014-w>
5. *Panichev A., Baranovskaya N., Seryodkin I., et al.* Excess of REE in plant foods as a cause of geophagy in animals in the Teletskoye Lake basin, Altai Republic, Russia // *World Academy of Sciences Journal*. 2022.

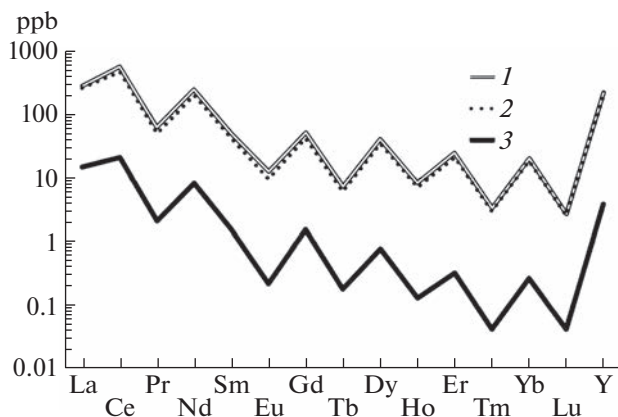


Рис. 3. Профили содержаний лантаноидов и Y в хвостовой железе взрослых самцов оленей *Cervus elaphus* из разных регионов с массовыми проявлениями геофагии: 1, 2 — с берега Телецкого озера (2 — повтор анализа); 3 — с Ольхона.

- V. 5: 6, 2023.
<https://doi.org/10.3892/wasj.2022b.183>
6. Silva Y.J.A.B., Nascimento C.W.A., Silva Y.J.A.B., Biondi C.M., Silva C.M.C.A.C. Rare earth element concentrations in Brazilian benchmark soils // *Rev Bras Cienc Solo*. 2016. V. 40. P. e0150413.
<https://doi.org/10.1590/18069657rbc20150413>
 7. Nahon D.B. Introduction to the Petrology of Soils and Chemical Weathering. New York: Wiley. 1991. P. 344.
 8. Янченко О.М., Тимкин Т.В., Ворошилов В.Г. и др. Характер распределения фосфатов в золотоносных корях выветривания Томского района // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2021. Т. 332. № 9. 74–91.
 9. Gaillardet J., Viers J., Dupré B. Trace Elements in River Waters // *Treatise on Geochemistry*. Elsevier, 2003. P. 225–272.
<https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/05165-3>
 10. Fiddler G., Tanaka T., Webster I. Low systemic adsorption and excellent tolerability during administration of Lanthanum carbonate (Fosrenol™) for 5 days. In 9th Asian Pacific Congress of Nephrology, 19–20. Februar 2003, Pattaya, Thailand, 2003.
 11. Hutchison A.J., Albaaj F. Lanthanum carbonate for the treatment of hyperphosphataemia in renal failure and dialysis patients // *Expert Opinion on Pharmacotherapy*. 2005. V. 6. № 2. P. 319–328.
 12. He M.L., Rambeck W.A. Rare earth elements – a new generation of growth promoters for pigs? // *Archives of Animal Nutrition*. 2000. V. 53. № 4. P. 323–334.
 13. He R., Xia Z. Effect of rare earth compounds added to diet on performance of growing- finishing pigs. *World Wide Web*,
<http://www.rare-earth-agri.com.cn/eng5.htm>, 2001. accessed 15. July 2001.
 14. Wang K., Cheng Y., Yang X., Li R. Cell Response to Lanthanides and Potential Pharmacological Actions of Lanthanides in Metal ions in biological systems, in: Sigel A., Sigel H., Sigel S. (Eds.), *Metal Ions in Biological Systems: Vol. 40: The Lanthanides and Their Interrelations with Biosystems*, volume 40. Marcel Dekker, Inc., New York, Basel, 2003.

DEFICIENCY OF RARE-EARTH ELEMENTS IN NATURAL LANDSCAPE COMPONENTS AS A CAUSE OF GEOPHYGY AMONG UNGULATES ON ODKHON ISLAND

A. M. Panichev^{a, #}, N. V. Baranovskaya^b, I. Ju. Chekryzhov^c, I. V. Seryodkin^a, V. V. Ivanov^c,
 E. A. Vakh^c, and E. V. Elovskiy^c

^a*Pacific Geographical Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation*

^b*Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation*

^c*Far East Geological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation*

[#]*E-mail: sikhote@mail.ru*

Presented by Academician of the RAS P.Ya. Baklanov March 22, 2023

The actuality of the work lies in the systematic study of the causes of geophagy from the viewpoint of the rare earth hypothesis. From the original results of complex geological-hydrobiogeochemical studies carried out on Odkhon Island (Lake Baikal), it follows that the phenomenon of geophagy among wild and domestic ungulates on the island is due to a deficiency of light rare earth elements (LREE) in plant foods and natural waters. The deficit is associated with a low concentration of LREE in the composition of the most common metamorphic terrigenous-carbonate rocks, deluvium and soils on the island. The similar geochemical specificity of landscapes can be the cause of LREE imbalance in the hormonal system of the body. Hormonal stress causes animals to regularly and periodically consume kaolinite clays of weathering rocks enriched with the necessary elements.

Keywords: geophagy, ungulates, rare earth elements, geology, biogeochemistry, Island Odkhon