

УДК 591.131.1:599.72/.73(571.56)
DOI: 10.18799/24131830/2025/6/4873
Шифр специальности ВАК: 1.6.21
Обзорная статья

Геофагия среди диких копытных в ландшафтах Якутии с низкими содержаниями редкоземельных элементов

А.М. Паничев¹, Н.В. Барановская^{2✉}, И.В. Серёдкин¹, И.М. Охлопков³, Н.В. Мамаев³,
И.Ю. Чекрызов⁴, Л.В. Жорняк², Е.А. Вах⁴, В.В. Иванов⁴, Т.Н. Луценко¹,
Р.А. Макаревич¹, Е.В. Еловский⁴, Д.С. Остапенко⁴, А.А. Потоскуев², Д.А. Стрепетов²

¹ Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Россия, г. Владивосток

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

³ Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, Россия, г. Якутск

⁴ Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Россия, г. Владивосток

✉ nata@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. На территории Якутии, в бассейнах рек Буотамы, Амги и Восточной Хандыги впервые проведены комплексные ландшафтно-геохимические исследования с изучением химического состава природных вод, почв, кормовых трав, а также поедаемых животными горных пород на кудурах – ландшафтных комплексах, посещаемых животными на протяжении длительных периодов с целью геофагии и специфически ими преобразованных. **Цель.** Определение причины геофагии, встречающейся на данных территориях среди диких и домашних животных. **Методы.** Атомно-эмиссионная спектрометрия; масс-спектрометрия; ионная хроматография; аналитический электронный сканирующий микроскоп с энергодисперсионным спектрометром. **Результаты.** Выявлено, что геофагия на территории Якутии распространена как в горных, так и на равнинных территориях в ландшафтах с низкими содержаниями подвижных форм редкоземельных элементов, способных накапливаться в кормах и питьевой воде. Предполагается, что недостаток редкоземельных элементов в диете животных становится причиной нарушения в их организме обмена этой группы элементов в нервной и эндокринной системах, что сопровождается специфическим гормональным стрессом. Состояние стресса заставляет животных искать способы минимизации возникшей проблемы, которую они решают путем потребления относительно обогащенных редкоземельными элементами минеральных или органо-минеральных сорбентов (в основном это глинистые породы и торфяные почвы) в местах их слабого засоления преимущественно карбонатными солями кальция, магния и натрия. Такие соли создают щелочную среду, благоприятную для формирования глинистых минералов-сорбентов, которые способны накапливать ионы редкоземельных элементов. Кроме того, соли натрия, воздействуя на ЦНС, помогают животным ослабить состояние стресса.

Ключевые слова: геофагия, кудуры, кудуриты, геохимия, гидрохимия, биогеохимия, редкоземельные элементы, Якутия

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проекты № 20-67-47005 и № 20-64-47021).

Для цитирования: Геофагия среди диких копытных в ландшафтах Якутии с низкими содержаниями редкоземельных элементов / А.М. Паничев, Н.В. Барановская, И.В. Серёдкин, И.М. Охлопков, Н.В. Мамаев, И.Ю. Чекрызов, Л.В. Жорняк, Е.А. Вах, В.В. Иванов, Т.Н. Луценко, Р.А. Макаревич, Е.В. Еловский, Д.С. Остапенко, А.А. Потоскуев, Д.А. Стрепетов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 6. – С. 194–216. DOI: 10.18799/24131830/2025/6/4873

UDC 591.131.1:599.72/.73(571.56)
DOI: 10.18799/24131830/2025/6/4873
Review article

Geophagy among wild ungulates in landscapes of Yakutia with low contents of rare earth elements

A.M. Panichev¹, N.V. Baranovskaya^{2✉}, I.V. Seryodkin¹, I.M. Okhlopkov³, N.V. Mamaev³,
I.Yu. Chekryzhov⁴, L.V. Zhorniyak², E.A. Vakh⁴, V.V. Ivanov⁴, T.N. Lutsenko¹,
R.A. Makarevich¹, E.V. Elovsky⁴, D.S. Ostapenko⁴, A.A. Potoskuev², D.A. Strepetov²

¹ Pacific Institute of Geography, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
Vladivostok, Russian Federation

² National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

³ Institute of Biological Problems of the Cryolithozone, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yakutsk, Russian Federation

⁴ Far Eastern Geological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
Vladivostok, Russian Federation

✉ nata@tpu.ru

Abstract. Relevance. For the first time, comprehensive landscape-geochemical studies were conducted in the Buotama, Amga and Vostochnaya Khandyga river basins of Yakutia. The studies included the chemical composition of natural waters, soils, forage grasses, and rocks eaten by animals on kudurs, landscape complexes visited by animals for long periods of time for geophagy and specifically transformed by them. **Aim.** To determine the cause of geophagy occurring in these areas among wild and domestic animals. **Methods.** Atomic emission spectrometry, mass spectrometry, ion chromatography, analytical electron scanning microscope with energy-dispersive spectrometer. **Results.** It was revealed that geophagy in Yakutia is widespread both in mountainous and flat areas in landscapes with low contents of mobile forms of rare earth elements that can accumulate in feed and drinking water. It is assumed that the deficiency of rare earth elements in the diet of animals causes a disruption in their body metabolism of this group of elements in the nervous and endocrine systems, which is accompanied by specific hormonal stress. The state of stress forces animals to look for ways to minimize the problem that has arisen. They solve it by consuming mineral or organomineral sorbents (mainly clay rocks and peat soils) relatively enriched with rare earth elements in places where they are slightly saline, mainly with carbonate salts of calcium, magnesium and sodium. Such salts create an alkaline environment favorable for the formation of clay mineral sorbents that are capable of accumulating ions of rare earth elements. In addition, sodium salts, by affecting the central nervous system, help animals alleviate the state of stress.

Keywords: geophagy, kudurs, kudurites, geochemistry, hydrochemistry, biogeochemistry, rare earth elements, Yakutia

Acknowledgements: The research was carried out within the framework of a grant from the Russian Science Foundation (Projects no. 20-67-47005, 20-64-47021).

For citation: Panichev A.M., Baranovskaya N.V., Seryodkin I.V., Okhlopkov I.M., Mamaev N.V., Chekryzhov I.Yu., Zhorniyak L.V., Vakh E.A., Ivanov V.V., Lutsenko T.N., Makarevich R.A., Elovsky E.V., Ostapenko D.S., Potoskuev A.A., Strepetov D.A. Geophagy among wild ungulates in landscapes of Yakutia with low contents of rare earth elements. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 6, pp. 194–216. DOI: 10.18799/24131830/2025/6/4873

Введение

Во многих районах мира преимущественно среди растительноядных животных распространен феномен поедания землистых веществ, который в научных текстах чаще всего обозначается термином «геофагия» [1–3]. В местах регулярного поедания землистых веществ копытными и другими крупными млекопитающими обычно формируются легко узнаваемые по внешним признакам локальные ландшафтные комплексы, которые в русско-

язычной научной литературе иногда обозначаются как «природные солонцы», а в англоязычной – близкими терминами «salt lick» или «mineral lick» (в переводе – «солевые» и, соответственно, «минеральные лизунцы») [4–6]. После того, как мы многократно убедились, что данные объекты далеко не всегда имеют прямое отношение к растворимым солям, кроме того, термин «солонцы» с совершенно другим смыслом давно используется в почвоведении, нами был предложен термин «кудур», заим-

ствованный из лексикона тюркскоязычных пастухов [7]. Производным термином – «кудурит» – мы обозначаем минеральные грунты, потребляемые животными на кудурах. Термин «lick», или «лизунец» в русскоязычном варианте, мы также используем, обозначая им отдельные выеденные или вылизанные углубления в пределах кудуров.

В данной статье приводятся результаты ландшафтно-геохимических исследований в районах с кудурами на территории Республики Саха (Якутия). Исследования в Якутии продолжают развитие наших идей о связи геофагии с редкоземельными элементами (РЗЭ). Связь массовых проявлений этого феномена среди животных с аномальными (как высокими, так и низкими) содержаниями РЗЭ в ландшафтных компонентах была предсказана нами еще в середине 2000 гг. [8, 9]. По итогам целенаправленных ландшафтно-геохимических исследований в период с 2021 по 2024 гг. такая связь была уже убедительно подтверждена в ряде районов Южной Сибири и Дальнего Востока [10–12].

Для предметного исследования кудуров на территории Якутии в июле 2023 г. нами были организованы полевые работы, в которых участвовали сотрудники Тихоокеанского института географии ДВО РАН в г. Владивостоке (ТИГ ДВО РАН) А.М. Паничев и И.В. Серёдкин; биолог из Томского политехнического университета (ТПУ) Н.В. Барановская, а также специалист в области изучения структуры и функционирования северных экосистем И.М. Охлопков и зоолог Н.В. Мамаев из Института биологических проблем криолитозоны СО РАН в г. Якутске (ИБПК СО РАН).

Работы проводились в трех административных районах республики: в Хангаласском (в приустьевой части р. Буотамы); в Амгинском (по р. Амге и ее притоку р. Крестях) и в Томпонском (в верховьях р. Восточной Хандыги). В задачи работ полевого сезона входило изучение особенностей местных кудуритов, а также кудуров как ландшафтных комплексов; необходимое геологическое доизучение районов с кудурами; системный пробоотбор природных вод, почв и растительности, а также скальных пород и рыхлых грунтов. Лабораторные инструментальные исследования собранного материала проводились в аналитических центрах институтов ДВО РАН и ТПУ.

В статье представлены результаты исследования химического и минерального состава опробованных ландшафтных компонентов. На их основе с привлечением компилятивных данных сделан вывод о наиболее вероятной причине потребления РЗЭ-носных земляных веществ растительноядными животными. Он в очередной раз усиливает обоснование «редкоземельной» причины геофагии, которая, как нам представляется, в природных

ландшафтах является главной причиной, объединяющей большинство известных в мире случаев массовых проявлений геофагии среди животных. Позиционируя «редкоземельную» причину геофагии как главную, мы подразумеваем, что она более распространена, нежели «натриевая» [13–15]. В равной степени это относится к прочим гипотезам о причинах геофагии, среди которых: восполнение в организме недостатка различных химических элементов [3, 6]; использование свойств глинистых минералов воздействовать на микробное сообщество и на регуляцию pH в пищеварительном тракте [16]; выведение из организма с помощью минеральных сорбентов токсичных химических соединений, в том числе органических [17]. Все эти гипотезы мы воспринимаем как вполне обоснованные, однако все они, как и «натриевая» гипотеза, в соответствии с нашими представлениями, имеют лишь вторичное, вспомогательное, значение.

Краткие сведения о районах работ и объектах исследования

Районы работ и их местоположение на территории Якутии показаны на рис. 1, А. Два района – № 1 (Буотама) и № 2 (Амга) – находятся в равнинной части, а район № 3 (Восточная Хандыга) – в горной. Район Буотама, в отличие от остальных, обозначен также на рис. 1, В в виде полигона в более крупном масштабе на фрагменте геологической карты М 1:200000 [18]. Все показанные на нем кудуры, как и все прочие, изученные нами в Якутии, относятся к сухому, или литоморфному, типу. На таких кудурах животные поедают земляные вещества. В данном случае это повсеместно суглинки в виде смеси песчано-илистого и глинистого материала. Общий вид основных представителей кудуров на Буотаме показан на рис. 2, А, В. При этом два кудура (Б1 и Б3 на рис. 1, В) образовались в верхней части речных склонов, а два других (Б2 и Б4) – в речной пойме. Наиболее предпочитаемые животными места выедания суглинков на кудурах в Якутии, как и в других регионах мира, часто приурочены к прикорневым частям травяных кочек, кустарников или деревьев. Среди подьедаемых деревьев на кудурах в Якутии чаще всего сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*) и лиственница Гмелина (*Larix gmelinii*). Выходы скальных разностей горных пород на кудурах по Буотаме наблюдались нами только на кудуре Б1 в виде немногочисленных каменных обломков, встречающихся среди рыхлых суглинков. Наиболее активными посетителями кудуров на Буотаме являются копытные, в их числе лось (*Alces alces*), благородный олень (*Cervus elaphus*) и сибирская косуля (*Capreolus pygargus*).

В районе работ № 2 (Амга) изучено два кудура (рис. 1, А), оба в бассейне р. Крестях (приток р.

Амги). Один из них (его местоположение отмечено точкой, которая ближе к р. Амге) представляет собой серию сухих обнажений в бортах покрытой травостоем террасы безымянного ручья, впадающего справа в р. Крестяхх приблизительно 7 км выше ее устья. В приустьевой части этого безымянного ручья на протяжении около 1,5 км практически везде, где минеральные горизонты террасы выходят на поверхность, имеются признаки их поедания животными в виде характерных, вскрытых копытами небольших карьеров, а также выеденных и вылизанных углублений (лизунцы). Один из фрагментов такого наиболее посещаемого животными обнажения, показан на рис. 2, С. Разнообразие посещающих данный кудур животных аналогично описанному в бассейне р. Буотамы.

Местоположение второго кудура в бассейне р. Крестяхх приблизительно в 45 км от первого по дороге Амга–Якутск. Объект представляет собой обнажение суглинков около 30 м длины в борту покрытой растительностью пойменной террасы с хорошо заметным издали небольшим вскрытым животными карьером с серией лизунцовых углублений. Судя по следам, оставленным на кудуре жи-

вотными, основными его посетителями являются домашние коровы, встречаются также следы сибирской косули.

На обоих кудурах по р. Крестяхх животные поедают практически идентичные рыхлые аллювиальные, возможно с примесью эолового материала, суглинки. Судя по геологической карте М 1:500000 (Р-52,53), на всей территории исследуемого района распространены однотипные породы нижней юры с преобладанием песчаников. Помимо суглинков, потребляемых животными в районе исследованных кудуров, опробовались почвы и растительность. Кроме того, были отобраны водные пробы из нескольких водотоков – из безымянного ручья с кудурами, из ряда притоков р. Крестяхх, а также из всех ручьев, впадающих в р. Амгу на протяжении 40 км вверх от поселка Амга.

В районе работ № 3 (Восточная Хандыга) нами также исследовано два кудура. Один в приустьевой части руч. Ньюкуня (прав. приток р. Восточной Хандыги в ее среднем течении), второй – в нижнем течении руч. Некулах, левого притока р. Сеторым, впадающей справа в р. Восточная Хандыга в ее верхнем течении.

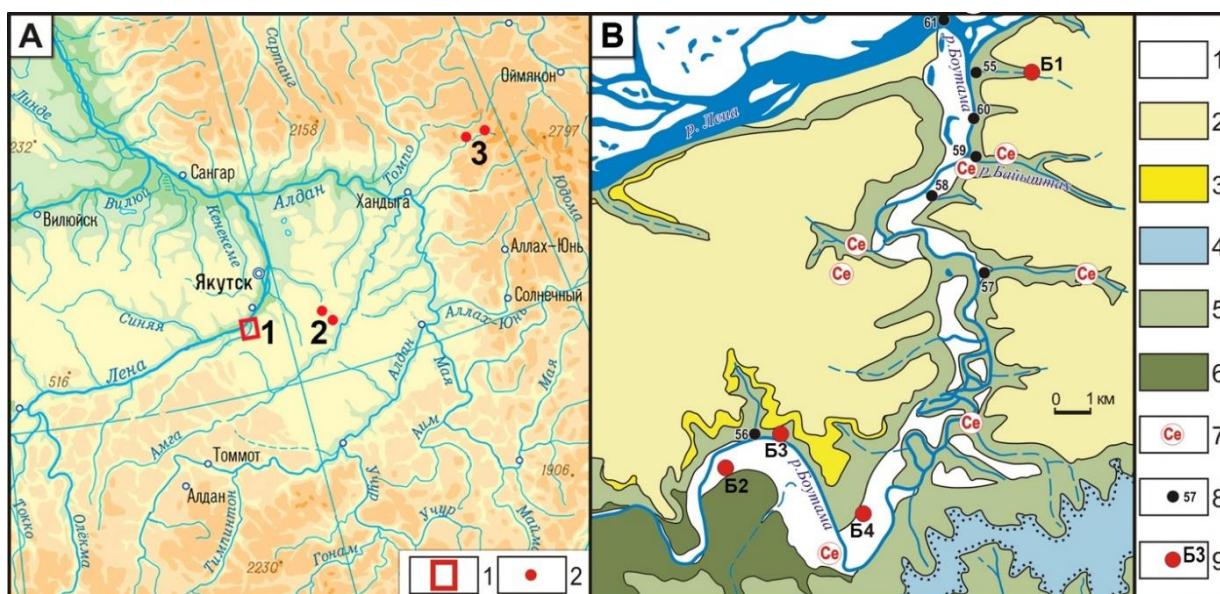


Рис. 1. А) местоположение районов с исследованными кудурами на территории Республики Саха (Якутия): 1 – в приустьевой части р. Буотамы; 2 – по р. Крестяхх; 3 – в верховьях р. Восточной Хандыги; В) геологическая схема района исследований в приустьевой части р. Буотамы: 1–6 – разновозрастные отложения, в том числе: 1 – речные пески и суглинки; 2 – покровные лёссовидные суглинки четвертичного возраста; 3 – неогеновые речные пески и галечники; 4 – пески, песчаники, конгломераты юрского возраста; 5 – известняки и мергели буотамской и кычинской свит, 6 – доломиты и известняки тойонского яруса кембрийского возраста; 7 – находки кристаллов монацита в шлихах; 8 – места отбора водных проб, почв и растительности; 9 – изученные кудуры

Fig. 1. А) location of areas with studied kudurs on the territory of the Republic of Sakha (Yakutia): 1 – at the mouth of the Buotama River; 2 – along the Krestyakh River; 3 – in the upper reaches of the Vostochnaya Khandyga River; В) geologic scheme of the study area in the mouth of the Buotama River: 1–6 – different-age sediments, including: 1 – river sands and loam; 2 – covering Quaternary age loess-like loams; 3 – Neogene river sands and gravels; 4 – Jurassic age sands, sandstones, conglomerates; 5 – limestones and marls of Buotama and Kychinskaya formations; 6 – dolomites and limestones of the Toyonsky Stage of Cambrian age; 7 – finds of monazite crystals in schlichs; 8 – sites of water samples, soils and vegetation; 9 – studied kudurs



Рис. 2. Фото фрагментов типичных «сухих» кудуров в районах исследования: А) верхняя часть ручьевого склона (бассейн р. Буотамы, кудур В1; на рис. 1, В, поедаемые породы – суглинки, залегающие на карбонатных породах кембрия); В) пойма р. Буотамы (лизунцовое углубление на кудуре В4, суглинки в борту пойменной террасы); С) подножие ручьевого склона в бассейне р. Крестях (кудур А1, речные суглинки на песчаных отложениях юрского возраста); D) верхняя часть борта ручья Ньюкунья (бассейн р. Восточной Хандыги, кудур Х1, суглинки в зоне выветривания девонских мергелистых песчаников с сульфидами)

Fig. 2. Photo of typical “dry” kudur fragments in the research areas: A) upper part of stream slope (Buotama River basin, kudur B1; Fig. 1, B, the eaten rocks are loams overlying Cambrian carbonate rocks); B) floodplain of the Buotama River (salt-licked depression on kudur B4, loams in the side of the floodplain terrace); C) base of the stream terrace in the basin of the Krestyakh River (kudur A1, river loams on sandy sediments of Jurassic age); D) upper part of the Nyukunnya creek side (Vostochnaya Khandyga river basin, kudur X1, loams in the weathering zone of Devonian marlaceous sandstones with sulfides)

Кудур по руч. Ньюкунья расположен в верхней части крутого ручьевого склона на высоте около 100 м от поверхности поймы. Представляет собой эрозионную воронку около 10 м диаметром, где на поверхность выходят в виде коренного развала мергелистые песчаники светло-желтоватого цвета, покрытые местами делювиальными суглинками. На изломе песчаников заметны мелкие кристаллы сульфидов (пирит, халькопирит). Судя по данным геологической съемки [19], породы относятся к бурхалинской серии среднего отдела девонской системы. Кудур посещают снежные бараны, (*Ovis nivicola*) обитающие на прилегающей горной территории, где, судя по геологическим материалам, преобладают доломиты и известняки девонского возраста.

Кудур по руч. Некулах представляет собой посещаемый снежными баранами участок в ручьевого пойме по правому борту. На площади около 100 м² здесь имеются характерные, выбитые и выеденные животными ниши и лизунцы среди аллювиальных

накоплений ручья, сложенных преимущественно песками с гравием и линзами суглинков с включениями разноразмерных валунов. Места выедания грунта приурочены к выходам суглинистых пород в основаниях кочек или в корневых частях деревьев и кустарников. По данным геологической съемки [20], в бассейне ручья распространены главным образом песчаники, алевролиты и аргиллиты среднего триаса.

Характерными ландшафтными особенностями районов с кудурами по р. Буотаме и по р. Амге является то, что они находятся в пределах залесенных с редкими луговинами территорий в равнинной части Якутии, где перепады высот не превышают 300 м. В составе лесных насаждений преобладают лиственница Гмелина и сосна обыкновенная. Местами встречается ель аянская (*Picea jezoensis*). В травяном покрове преобладают злаки (*Gramineae*) и осоки (*Carex spp.*), составляющие существенную часть пищевого рациона копытных. Район с кудурами в верховьях р. Восточной Хандыги находится в гор-

ной части Якутии, где перепады высот достигают более 1500 м. Один из обследованных кудуров на данной территории (в устье р. Ньюкуння) находится в лесной зоне на абсолютной отметке около 800 м, а второй (по руч. Некулах) – на границе леса на высоте около 1200 м.

Среди почв в исследованных районах преобладают мерзлотно-таежные подзолистые. Климат резко континентальный. Средняя температура зимних месяцев составляет около -35°C . Лето короткое, но теплое. Средняя температура июля $+16,5^{\circ}\text{C}$. Годовое количество осадков от 300 до 400 мм, большая их часть выпадает летом.

В заключение очерка о территории и объектах исследования следует отметить, что геофагия в названных районах Якутии выражена относительно слабо, по сравнению с масштабами потребления грунтов, например, в Сихотэ-Алине, в Горном Алтае и в Прибайкалье. Основные пики геофагии приходятся, как и везде в Якутии, на начало–середину лета с максимумом в июле [21].

Материалы и методики отбора проб

Работы на территории Якутии проводились в период с 29 июня по 13 июля 2023 г. Транспортировка отряда осуществлялась на двух автомашинах УАЗ, а также на моторных лодках (по рекам Буотаме и Амге).

В районе № 1 (Буотамы) собрано 7 проб воды, 7 – кудуритов и 1 каменная проба, 18 – почв и 13 – растительности. В районе № 2 (Амга) отобрано 7 проб воды, 6 – кудуритов, 21 – почв и 19 – растений. В районе № 3 (Восточная Хандыга) отобрано 18 проб воды, 4 – кудуритов, 3 – каменные пробы, 17 – почв и 15 – растительности. Позиции точек пробоотбора фиксировались с помощью GPS-приемников. Работы были обеспечены геологическими картами М 1:200000.

Вода набиралась в полиэтиленовые емкости 250 мл, которые находились до приезда в г. Владивосток в автомобильном холодильнике. Скальные и землистые пробы отбирались массой около 300 г и упаковывались в прочные полиэтиленовые пакеты. Сбор почвенных проб проводился либо в непосредственной близости от кудуров (на склонах, поверхности и в подножии речных террас, где имеются признаки поедания суглинков), либо в отдалении от кудуров. Во втором случае отбор почв проводился в привязке к отборам водных проб. При этом отбор почв проводился также на поверхностях, склонах и в подножии ручьевых и речных террас. Сбор надземных частей растений проводился в том же, где и почвенные пробы, не далее 5-метрового радиуса. Из травянистых растений повсеместно отбирались осоки (*Carex enervis*, *C. duriuscula*, *C. praecox*, *C. nigra*) как самые распространенные

виды трав в меню копытных, которые помещали в бумажный пакет.

Методы физико-химических исследований

Анализы состава водных проб и проб горных пород выполнены в Аналитическом центре Дальневосточного геологического института ДВО РАН (АЦ ДВГИ ДВО РАН, г. Владивосток) методами атомно-эмиссионной спектроскопии (ИСП-АЭС) на спектрометре iCAP 7600 Duo (Thermo Scientific, США) и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) на спектрометре Agilent 7700x (Agilent Technologies, США), а также методом ионной хроматографии на хроматографе LC-20 (Shimadzu, Япония). Там же был изучен порошковый материал кудуритов на аналитическом сканирующем электронном микроскопе (SEM – Tescan Lyra 3 XMH) с энергодисперсионным спектрометром (EDS – AZtec X-Max 80 Standart).

Анализы состава проб почв и растительности осуществлялись в лабораториях Томского политехнического университета аналогичными методами плазменной спектроскопии (ИСП-МС).

Подготовка водных проб к анализу производилась в Тихоокеанском институте географии ДВО РАН (ЦКП ТИГ ДВО РАН, г. Владивосток). При этом сначала в отдельной аликвоте выполнялись определения pH и щелочности. Затем каждая проба фильтровалась через мембранный фильтр (PVDF – 0,45 мкм) с применением вакуумного насоса и разливалась в две полипропиленовые пробирки емкостью 50 мл. Еще 15 мл фильтрата уходило на определение растворенного органического углерода (анализатор TOC_{VCPN} , Shimadzu, Япония). Далее пробирки с водой направлялись для анализа в АЦ ДВГИ ДВО РАН.

Рентгенографическая диагностика минерального состава проведена на рентгеновском дифрактометре Ultima-IV фирмы Rigaku (Япония) в Институте геологии рудных месторождений (ИГЕМ РАН, г. Москва).

Для оценки выхода из кудуритов химических элементов в условиях pH среды, соответствующей кислотности содержимого сычуга жвачных, 8 проб были подвергнуты солянокислым вытяжкам. Навеска кудурита массой 5 г заливалась 100 мл раствора HCl с pH-2, для которого использовали деионизированную воду (18,2 МΩхсм) и перегнанную особо чистую кислоту. Показатель pH в суспензии после заливки проб раствором HCl в течение 12 часов доводили до устойчивого значения 2,0 добавлением 5 %-го раствора кислоты. Затем залитые кислым раствором пробы с устоявшимся pH-2,0 отстаивали дополнительно еще 12 часов. Таким образом, общее время приготовления вытяжки составляло 24 часов. Супернатант центрифугировали

при 4500 об/мин в пластиковых стаканах в течение 30 мин и передавали в АЦ ДВГИ ДВО РАН на элементный анализ.

Математическая обработка численных результатов была проведена с помощью программ Excel и STATISTICA, которые являются частью лицензионного комплекса программ Томского политехнического университета.

Результаты

Гидрохимия

Основные гидрохимические показатели в водных пробах из районов исследований представлены в табл. 1. В пробах из района № 1 (Буотама) содержание растворимого органического углерода (РОУ) колеблется от 8,5 до 35,5 мг/л, среднее – 23,98. Показатель pH колеблется от 7,99 до 8,30. Воды по составу главных компонентов гидрокарбонатно-кальций-магниевого с минерализацией от 270 до 386 мг/л. В составе микроэлементов в них наибольшие значения достигают (в мкг/л в порядке уменьшения) у Sr (от 92,3 до 235), Fe (2,87...327), P (5,24...71,5), Ba (8,82...13,3), Zn (0,729...12,3), B (3,96...12,1), Cu (0,648...3,72), Li (1,50...2,91), Ni (0,73...2,98), Mn (0,551...1,32), Ti (0,144...1,22), Al ($\leq 0,34...2,3$) и U (0,02...1,39). Концентрация остальных элементов ниже 1 мкг/л. Содержание всех РЗЭ ниже регионального (река Лена) и существенно ниже общемирового фона (по [23]). Доля Се в пробах вод варьирует от 0,000265 до 0,0018 мкг/л. По элементам тяжелой подгруппы (от Gd до Lu) концентрации в большинстве проб ниже порога чувствительности прибора.

Проанализированные воды из района № 2 (Амга) имеют столь же повышенные содержания РОУ (от 10,8 до 30,6, в среднем – 19,86 мг/л). Значение pH колеблется от 7,55 до 8,11). По главным компонентам все воды гидрокарбонатно-кальций-магниевого. Минерализация их близка водам из района Буотамы и варьируется от 222 до 341 мг/л (среднее – 281). К микроэлементам с самыми высокими значениями относятся Sr (110...180 мкг/л), Fe (6,29...137), P (3,3...157), Ba (8,78...23,3), B (7,81...17,9), Li (2,8...6,49), Ni (0,885...4,16), Cu (0,412...2,88) и Zn (0,380...2,08). Остальные ниже 1 мкг/л. Концентрации всех РЗЭ также ниже регионального (река Алдан) и общемирового речного фона. Доля Се в пробах вод колеблется от $\leq 0,00014$ до 0,00394 мкг/л. По элементам тяжелой подгруппы (от Gd до Lu) их концентрации в большинстве проб также оказались ниже порога чувствительности прибора.

Пробы вод, собранные в районе № 3 (Восточная Хандыга), показали самые низкие из трех районов содержания РОУ (от 0,8 до 2,7, в среднем 1,97 мг/л), самые низкие показатели pH (от 6,42 до 7,90) и самые низкие значения минерализации – от 45,5 до 242 мг/л, среднее – 110. Самые низкие в них также и показатели практически всех химических компонентов, кроме SO_4^{2-} и NO_3^- . По составу главных компонентов воды разные: гидрокарбонатно-кальциевые, гидрокарбонатно-сульфатно-кальциево-магниевого и сульфатно-гидрокарбонатно-кальциево-магниевого. Среди микроэлементов самые высокие показатели в таких водах выявлены по Sr (от 36,8 до 329 мкг/л), Fe (1,01...75,6) и Ba (2,12...33,9). По остальным микроэлементам все значения ниже 1 мкг/л. Концентрации РЗЭ также существенно ниже регионального (р. Алдан и Лена) и мирового фона по рекам. Доля Се колеблется от 0,000151 до 0,0272 мкг/л, по большинству элементов тяжелой подгруппы показатели также ниже порога чувствительности прибора. Важно отметить, что наибольшие значения РЗЭ из всех ручьевых проб, собранных в Якутии, показала проба № 37. Она была отобрана из правого притока руч. Некулах, в 100 м ниже устья которого находится один из исследованных кудуров.

На рис. 3 представлены профили NASC-нормированных содержаний РЗЭ в тех пробах вод из обследованных районов, где удалось выявить весь набор РЗЭ, там же показатели по р. Лене и рекам мира [22].

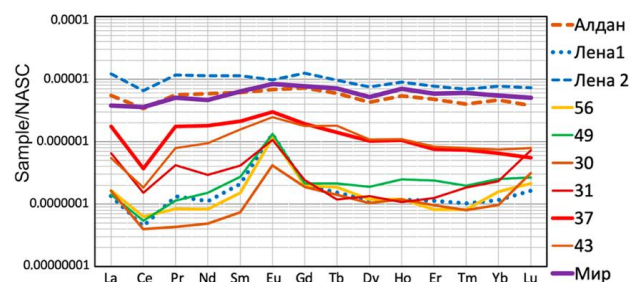


Рис. 3. Профили содержаний РЗЭ, нормированных на значения североамериканского сланца (NASC) в пробах вод из обследованных районов, в которых удалось определить весь набор РЗЭ. Для сравнения взяты показатели по р. Лене, Алдан, а также мира (по [22])

Fig. 3. Profiles of REE contents normalized to North American shale composite (NASC) values in water samples from the surveyed areas, where it was possible to determine the whole set of REE. For comparison, the values for the Lena, Aldan, and world rivers are taken (according to [22])

Таблица 1. Минерализация, pH и ионный состав водных проб из районов исследований
Table 1. Mineralization, pH and ionic composition of water samples from the study areas

№ пробы Sample no.	Масса, мг Mass, mg	Концентрация ионов, мг/л/Ion concentration, mg/l										
		pH	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Ca	Mg	K	Na	Si	PO _Y
Река Лена/Lena river												
Лена 1/Lena1	135,3	7,15	57,6	18,9	14,3	0,68	17,20	4,80	0,60	13,38	1,92	5,9
Лена 2/Lena2	82,4	6,98	39,3	5,05	9,71	0,12	11,98	3,06	0,46	4,25	2,32	6,2
Среднее/Mean	108,9	7,07	48,5	12,0	12,0	0,4	14,59	3,93	0,53	8,82	2,12	6,1
Район Буотамы (Buotama area)												
55	264,7	7,99	205,6	<0,1	<0,1	<0,1	13,40	5,95	0,11	1,62	1,73	36,3
56	395,8	8,30	310	1,72	10,1	<0,1	15,98	20,91	1,20	5,90	3,70	26,3
57	349,2	8,16	264,2	1,77	0,55	<0,1	13,73	18,60	1,05	10,60	3,21	35,5
58	386,4	8,30	310	0,32	<0,1	<0,1	28,49	15,32	1,55	1,96	2,49	26,3
59	270,2	8,05	213,6	0,83	5,84	<0,1	21,46	16,42	0,46	1,13	1,78	8,7
60	264,4	8,20	217,8	0,59	5,71	<0,1	13,01	15,47	0,42	1,02	1,88	8,5
Район Амга/Amga area												
Амга/Amga	221,8	8,11	163,5	1,42	8,99	<0,1	23,59	10,85	0,35	1,12	1,23	10,8
47	242,2	7,89	163,5	2,47	9,94	<0,1	34,24	15,93	0,48	2,25	1,80	11,6
48	231,3	7,58	158	1,18	8,42	<0,1	33,62	15,70	0,40	1,25	1,80	10,9
49	230,5	7,55	155,6	0,24	5,35	<0,1	31,76	16,14	0,57	0,86	3,02	17,0
50	341,0	8,10	242,2	19,0	7,18	0,63	14,06	21,36	1,03	12,55	2,43	20,6
51	268,6	7,87	186,1	0,24	0,75	0,42	16,18	18,43	1,08	4,58	3,28	37,5
52	226,2	7,95	154,4	0,32	<0,1	<0,1	20,94	11,90	0,90	3,57	3,59	30,6
Район Восточная Хандыга/Vostochnaya Khandyga area												
Алдан/Aldan	120,7	7,18	75,6	0,72	3,5	<0,1	16,34	7,13	0,47	2,98	2,18	11,8
30	176,6	7,90	162,9	<0,1	1,19	1,05	5,48	2,79	0,15	0,41	1,60	1,0
31	242,0	7,58	144	0,19	74,9	0,93	7,49	9,83	0,47	1,35	1,69	1,2
32	135,7	6,97	56,7	0,21	58,1	0,45	8,10	7,06	0,50	1,89	1,29	1,4
33	96,7	7,28	82	<0,1	6,0	0,29	3,21	1,78	0,07	0,32	0,33	2,7
34	108,7	7,45	83,4	0,24	15,1	0,68	3,67	2,53	0,21	0,40	0,32	2,2
35	103,5	7,40	76,6	<0,1	16,5	0,69	4,75	3,41	0,16	0,29	0,28	0,8
36	89,4	6,70	13,7	<0,1	59,5	0,21	7,41	3,60	0,47	2,32	1,11	1,1
37	38,0	6,42	11,5	<0,1	14,1	0,63	7,45	0,64	0,33	1,30	0,89	1,2
38	85,3	6,95	26,6	<0,1	46,8	0,43	2,70	1,65	0,45	3,78	0,95	2,0
39	81,5	6,70	18,9	<0,1	48,5	0,19	6,04	3,48	0,38	1,46	1,09	1,5
40	58,9	6,65	14,4	0,17	31,3	<0,1	7,12	0,94	0,51	2,78	0,68	1,0
41	97,0	6,96	14,4	<0,1	60,3	0,4	9,88	8,36	0,33	1,36	0,77	1,2
42	136,1	6,79	23,2	<0,1	80,6	0,18	18,28	6,94	0,57	3,63	1,56	1,1
43	45,5	6,59	15,1	<0,1	15,4	0,59	8,27	0,79	0,38	2,49	0,76	1,7
44	112,1	6,67	26,4	0,15	67,1	0,25	7,85	5,92	0,37	1,82	0,82	1,4
45	120,9	6,99	19,5	<0,1	83,5	0,11	6,84	5,36	0,54	3,26	0,80	1,0
46	135,2	7,90	88,5	0,24	31,4	0,56	7,17	5,40	0,24	0,30	0,28	1,1

Примечание. Лена 1 – проба из р. Лены у пос. Нижний Бестях; Лена 2 – приустьевая часть р. Буотамы; места отбора проб 55–60 показаны на рис. 1, В; Амга – из р. Амги в 50 км выше пос. Амга; 47 – 3 км ниже пробы Амга из ручья, лев. притока Амги; 48 – отобрана из правого притока Амги в 8 км выше пос. Амга; 49 – из ручья, правого притока Амги в 5 км выше пос. Амга; 50 – из р. Крестях в устье; 51 – из р. Крестях 20 км от устья; 52 – лев приток р. Крестях 50 км от устья; 30 – р. Томпорук, прав. приток р. Восточной Хандыги; 31 – родник «Шаман» 30 км выше по р. В. Хандыге; 32 – р. Восточная Хандыга 3 км выше родника; 33 – прав. приток р. Восточной Хандыги недалеко от пос. Развилка; 34 – прав. приток р. Восточной Хандыги выше пос. Развилка; 35 – руч. Ньюкунья в устье, прав. приток р. Восточной Хандыги; 36 – руч. Некулах, лев. приток р. Сеторым; 37 – прав приток руч. Некулах в 100 м выше кудура Некулах; 38 – лев. приток р. Сеторым выше руч. Некулах; 39 – прав приток р. Сеторым у наледной поляны; 40 – прав. приток выше наледной поляны; 41 – руч. Адъеме, прав. приток р. Восточной Хандыги; 42 – р. Кербелях; 43 – прав приток р. Сеторым в 4 км от устья; 44 – лев. приток р. Сеторым 6 км от устья; 45 – лев. приток р. Сеторым 8 км от устья; 46 – прав. приток р. Куранах в устье.

Note. Lena 1 – sample from the Lena River near Nizhny Bestyakh settlement; Lena 2 – mouth of the Buotama River; sampling locations 55–60 are shown in Fig. 1, B; Amga – from the Amga River 50 km upstream of Amga settlement; 47 – 3 km downstream of the Amga sample from a stream, left tributary of Amga; 48 – sampled from a right tributary of Amga 8 km upstream of Amga settlement; 49 – from a stream, right tributary of the Amga 5 km upstream of Amga settlement; 49 – from a stream, right tributary of Amga 5 km upstream of Amga settlement; 50 – from the Krestykh River at the mouth; 51 – from the Krestykh River 20 km from the mouth; 52 – left tributary of the Krestykh River 50 km from the mouth; 30 – the Tomporuk River, right tributary of the Vostochnaya Khandyga River; 31 – the “Shaman” spring 30 km upstream of the V. Khandyga River; 32 – the Vostochnaya Khandyga River 3 km above the spring; 33 – right tributary of the Vostochnaya Khandyga River near Razvilka settlement; 34 – right tributary of the Vostochnaya Khandyga river above Razvilka settlement; 35 – the Nyukunnya brook at the mouth, right tributary of the Vostochnaya Khandyga River; 36 – Nekulakh brook, left tributary of the Setorim River; 37 – right tributary of the Nekulakh brook 100 m above the Nekulakh kudur; 38 – left tributary of the Nekulakh River above the Nekulakh kudur; 39 – right tributary of the Setorim River above the Nekulakh brook; 40 – right tributary above the ice glade; 41 – the Adieme brook, right tributary of the the Vostochnaya Khandyga River; 42 – Kerbelyakh River; 43 – right tributary of the Setorim River 4 km from the mouth; 44 – left tributary of the Setorim River 6 km from the mouth; 45 – left tributary of the Setorim River 8 km from the mouth; 46 – right tributary of the Kuranakh River at the mouth.

Геохимия кудуритов и скальных пород на кудурах

Содержание главных оксидов в кудуритах и в некоторых скальных породах на кудурах Якутии представлены в табл. 2 (скальные разности в таблице выделены серым полем). Очевидно, что практически все кудуриты по составу основных оксидов очень близки. Существенное различие наблюдается только по содержанию оксида кальция, что сразу же сказывается и на содержании оксида кремния, и на потерях при прокаливании.

По составу наиболее значимых микроэлементов кудуриты из двух обследованных районов Якутии (Буотамы и Амга) почти идентичны (рис. 4, А, В). Не исключено, что материнской основой кудуритов в обоих районах послужили одни и те же лёссовидные породы, отлагавшиеся на обширной террито-

рии Якутии в виде покровов эолового песка и пыли в позднем плейстоцене и голоцене [23].

Суглинки, поедаемые животными в районе Восточная Хандыга (горная территория), по составу и соотношениям микроэлементов имеют уже меньше сходства с кудуритами по Буотаме и Амге (рис. 4, С). В них явно сказывается присутствие вкрапленности различных рудных минералов, в том числе с сульфидов железа, что наблюдается визуально при осмотре кудуритов по руч. Ньюкуння.

На диаграммах (рис. 5) представлены содержания в кудуритах редкоземельных элементов в количественном выражении и в пересчете на североамериканский сланец (NASC).

Как вполне очевидно из представленных диаграмм, по составу и соотношению РЗЭ все исследованные нами кудуриты обозначенной территории Якутии практически идентичны.

Таблица 2. Содержание главных элементов в кудуритах Якутии (оксиды в мас. %)

Table 2. Content of major elements in kudurites of Yakutia (oxides in wt %)

Проба/Sample	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O-	ППП	Σ
Буотамы № 1/Buotama no. 1													
B1-1	62,73	0,60	12,94	4,510	0,073	3,416	4,149	2,397	2,631	0,162	1,150	4,920	99,67
B1-2	59,93	0,63	13,09	4,888	0,079	3,989	4,307	2,232	2,631	0,164	1,240	6,430	99,61
B1-3	3,930	0,05	0,851	0,873	0,057	1,241	51,65	0,091	0,200	0,145	0,190	40,37	99,64
Буотамы № 2/Buotama no. 2													
B2-1	49,43	0,56	11,42	4,469	0,079	3,963	11,04	2,062	2,284	0,140	1,950	12,38	99,78
B2-2	52,46	0,57	11,68	4,327	0,067	2,933	9,543	2,179	2,443	0,164	2,220	11,17	99,76
B2-3	57,07	0,62	12,57	4,564	0,083	2,301	5,154	1,957	2,756	0,143	2,940	9,680	99,84
Буотамы № 3/Buotama no. 3													
B3	54,19	0,58	12,67	4,676	0,079	2,831	5,517	2,120	2,528	0,156	3,550	10,67	99,57
Буотамы № 4/Buotama no. 4													
B4	58,48	0,62	12,93	4,802	0,078	2,809	4,749	2,118	2,632	0,162	2,590	7,650	99,62
Амга № 1/Amga no. 1													
A1-1	62,15	0,65	13,54	4,779	0,069	2,260	2,857	2,327	2,872	0,151	2,470	5,500	99,63
A1-2	61,89	0,64	13,15	4,650	0,073	2,152	2,729	2,267	2,844	0,143	2,930	6,280	99,74
A1-3	58,94	0,57	12,74	4,600	0,076	1,618	1,887	1,906	2,449	0,165	4,230	10,51	99,69
A1-4	59,84	0,62	13,57	4,725	0,072	2,606	2,891	2,324	2,710	0,139	3,170	6,910	99,57
Амга № 2/Amga no. 2													
A2-1	59,82	0,62	13,32	4,649	0,076	2,569	3,283	2,526	2,677	0,166	2,720	7,120	99,55
A2-2	57,63	0,60	13,31	4,578	0,073	3,051	3,766	2,762	2,627	0,136	3,130	7,950	99,61
Восточная Хандыга № 1/Vostochnaya Khandyga no. 1													
X1-1	24,78	0,62	5,074	1,691	0,166	2,828	33,47	0,471	3,759	0,122	0,030	26,51	99,52
X1-2	38,50	0,70	10,64	6,241	0,095	7,807	15,07	1,038	3,816	0,229	0,150	15,43	99,71
X1-3	41,15	0,89	10,28	9,187	0,182	10,76	9,354	0,380	4,175	0,287	0,080	12,94	99,67
X1-4	28,08	0,55	7,759	5,327	0,103	4,879	20,63	0,791	3,837	0,155	2,990	17,72	92,82
Восточная Хандыга № 2/Vostochnaya Khandyga no. 2													
X2-1	50,25	1,04	13,42	8,145	0,070	4,609	3,920	1,405	4,895	0,119	1,350	10,58	99,81
X2-2	68,21	0,56	14,69	4,589	0,048	1,218	0,327	2,008	3,329	0,111	1,020	3,600	99,71
X2-3	62,82	0,54	15,99	4,246	0,062	1,030	0,438	1,985	3,245	0,106	1,800	7,290	99,55

Примечание. B1-1, B1-2 – поедаемые животными породы на кудуре № 1 (рис. 1, В); B1-3 – известняк (обломки, там же); B2-1–B2-3 – суглинки, поедаемые на кудуре № 2 (рис. 1, В); B3 – суглинки, поедаемые на кудуре № 3 (рис. 1, В); B4 – суглинки, поедаемые на кудуре № 4 (рис. 1, В); A1-1–A1-4 – суглинки, поедаемые животными по левому притоку р. Крестях в 7 км от устья; A2-1, A2-2 – суглинки, поедаемые коровами в долине р. Крестях в 52 км от устья; X1-1–X1-3 – различные типы мергелистых песчаников с сульфидами на площадке кудура по руч. Ньюкуння; X1-4 – суглинок, поедаемый животными (там же); X2-1–X2-3 – поедаемые суглинки на кудуре по руч. Некулах.

Note. B1-1, B1-2 – rocks eaten by animals on kudur no. 1 (Fig. 1, B); B1-3 – limestone (fragments, ibid.); B2-1–B2-3 – loams eaten on kudur no. 2 (Fig. 1, B); B3 – loams eaten on kudur no. 3 (Fig. 1, B); B4 – loams eaten on kudur no. 4 (Fig. 1, B); A1-1–A1-4 – loams eaten by animals along the left tributary of the Krestykh River 7 km from the mouth of the Krestykh River; A2-1, A2-2 – loams eaten by cows in the valley of the Krestykh River 52 km from the mouth; X1-1–X1-3 – various types of marlaceous sandstones with sulfides at the kudur site along the Nyukunnya brook; X1-4 – loam eaten by animals (ibid.); X2-1–X2-3 – eaten loams at the kudur along the Nekulakh brook.

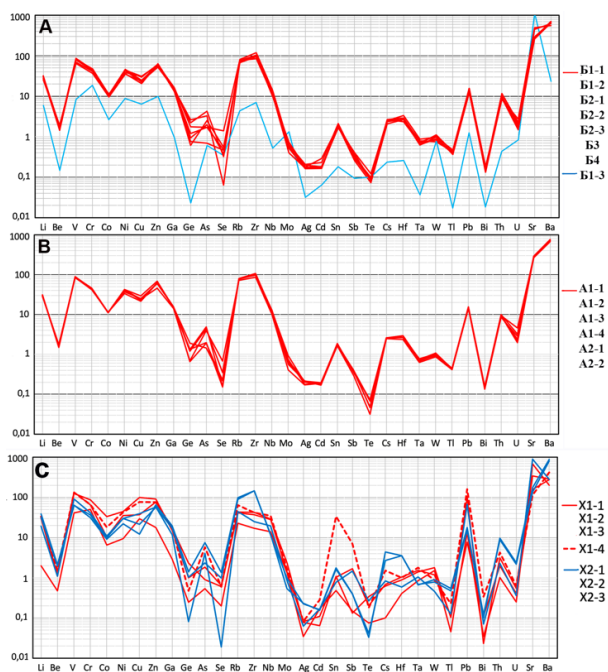


Рис. 4. Диаграммы содержаний микроэлементов в поедаемых животными суглинках: А) на четырех кудурах и в карбонатной породе в бассейне р. Буотамы; В) на двух кудурах в бассейне р. Амги; С) на двух кудурах в бассейне р. Восточной Хандыге

Fig. 4. Diagrams of trace element contents in animal-eaten loams: А) on four kudurs and in carbonate rock in the Buotama River basin; В) on two kudurs in the Amga River basin; С) on two kudurs in the basin of the Vostochnaya Khandyga River

Представленные графики отражают вероятную связь кудуритов в горной части Якутии с покровными лёссовидными суглинками, которые послужили основой для кудуритов в равнинной части Якутии. Очевидно, что наибольшие содержания в составе РЗЭ во всех кудуритах показывают элементы легкой подгруппы (La, Ce, Pr, Nd), а также Sc и Y.

Минералогия

Рентгенодифракционный анализ

Минеральный состав кудуритов и некоторых горных пород, отобранных на пяти объектах в трех районах Якутии, по данным количественного рентгенодифракционного анализа, представлен в табл. 3. Судя по перечню минералов, большая часть кудуритов данных районов имеет близкий состав. Основным их минеральным компонентом являются микроразерная кварца (от 18 до 23 %) и полевых шпатов (от 31 до 37 %), а среди вторичных минералов – глинистые (сметит, гидрослюда, хлориты и каолинит), составляющие в сумме от 20,5 до 36,3 % с преобладанием сметита и сметитоподобных минералов (от 10,3 до 16,2 %). Как примесь встречаются карбонаты (кальцит и доломит), иногда гидрокарбонат натрия (сода 2,7 %) и цеолиты (0,9 %). В составе кудуритов по руч. Ньюкунья, в которых отмечается существенная примесь кальцита, среди глинистых минералов отсутствуют сметиты. Между каменных обломков на кудуре № 1 по Буотаме выявлена карбонатная порода (Б1-3), состоящая из кальцита с примесью доломита.

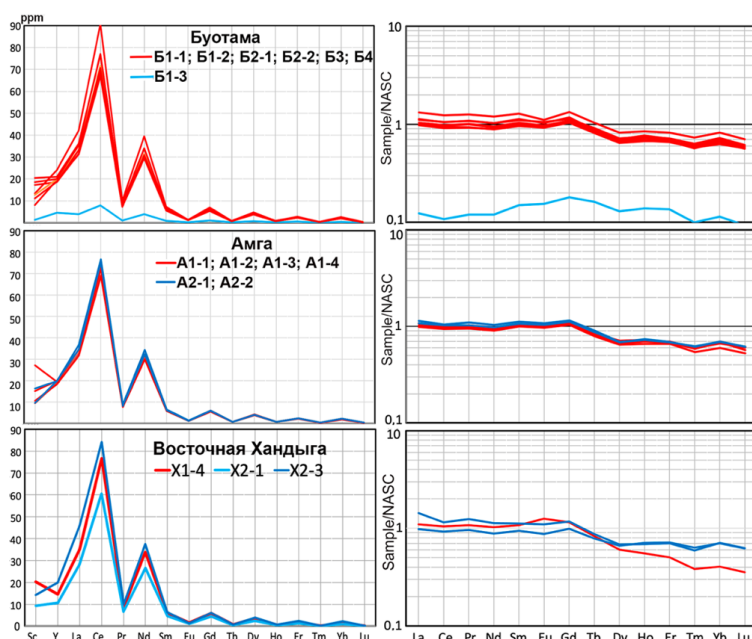


Рис. 5. Диаграммы содержаний РЗЭ в поедаемых животными суглинках в бассейнах рек Буотамы, Амги и Восточной Хандыги и то же в NASC-нормированном виде

Fig. 5. Diagrams of REE contents in animal-eaten loams in the Buotama, Amga and Vostochnaya Khandyga river basins and the same in NASC-normalized form

Таблица 3. Результаты рентгенодифракционного количественного минералогического анализа горных пород из исследованных кудуров на территории Якутии

Table 3. Results of X-ray diffraction quantitative mineralogical analysis of rocks from studied kudurs on the territory of Yakutia

№ пробы Sample no.	Минералы/Minerals, %														
	Смектит+Иллит-смектит* Smectite+Illite-smectite*	Слюдастые минералы** Mica minerals**	Хлорит/Chlorite	Каолинит/Kaolinite	Кварц/Quartz	Плагиоклаз (альбит) Plagioclase (albite)	КПШ (микроклин, ортоклаз) Potassium feldspar (microcline, orthoclase)	Кальцит/Calcite	Доломит/Dolomite	Гипс/Gypsum	Актинолит/Actinolite	Цеолиты/Zeilites***	Пирит/Pyrite	Гематит/Hematite	Сода/Sodium
Буотама/Buotama															
Б1-1	10,3	4,2	5,3	0,7	32,2	18,1	19,1	1,4	3,5	-	2,5	-	-	-	2,7
Б1-3	-	-	-	-	1,4	-	-	96,3	2,4	-	-	-	-	-	-
Амга/Amga															
A1-1	13,2	15,0	2,1	2,4	30,9	20,7	10,8	1,2	1,2	-	1,6	0,9	-	-	-
A2-1	15,8	5,1	4,6	1,9	27,0	23,0	14,5	2,8	1,6	-	3,8	-	-	-	-
Восточная Хандыга/Vostochnaya Khandyga															
X1-1	-	0,3	-	-	6,1	3,7	24,7	53,4	10,9	-	-	-	0,9	-	-
X1-4	-	13,5	6,3	-	17,8	12,8	23,0	15,3	2,5	8,4	-	-	-	0,4	-
X2-1	16,2	14,3	4,8	1,1	33,6	21,6	8,4	-	-	-	-	-	-	-	-

Примечание. «–» – не обнаружено; (*) – смешаннослойные иллит-смектитовые минералы с преобладанием смектитовых межслоев; (**) – мусковит, иллит; (***) – клиноптилолит, гейландит. Расшифровка проб – примечание к табл. 2. Серым полем отмечены скальные породы.

Note. “–” – not detected; (*) – mixed-layer illite-smectite minerals with predominance of smectite interlayers; (**) – muscovite, illite; (***) – clinoptilolite, geilandite. Deciphering of samples – note to Table 2. The gray field indicates rocky rocks.

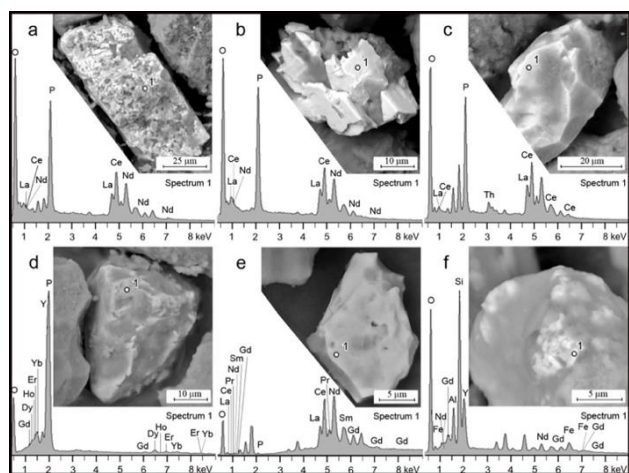


Рис. 6. Типовые электронные изображения и ЭДС-спектры состава РЗЭ-минералов из изученных кудуритов: фосфаты РЗЭ легкой группы (моназит?) (a, b, c); фосфат иттрия (ксенотим?) (d); РЗЭ-силикат (церанит?) (e); РЗЭ-оксид (алланит?) (f)

Fig. 6. Typical electronic images and EDS spectra of REE minerals composition from studied kudurites: REE phosphates of light group (monazite?) (a, b, c); yttrium phosphate (xenotime?) (d); REE silicate (cerianite?) (e); REE oxide (allanite?) (f)

А среди скальных обломков на кудуре по руч. Ньюкуня в бассейне р. Восточной Хандыги также выявлена высококарбонатная порода (X1-1) с кальцитом, доломитом и существенной примесью кварц-полевошпат-слюдистого терригенного материала. Важной минеральной примесью в кудуритах на территории бассейна р. Восточной Хандыги являются сульфиды железа и продукты их окисления (гематит и его гидратированные аналоги).

Аналитическая сканирующая электронная микроскопия

Редкоземельные минералы (по данным сканирующей электронной микроскопии с ЭДС-анализатором) в изученных образцах представлены преимущественно агрегатами (часто корродированными) фосфатов РЗЭ легкой подгруппы, иногда с повышенными содержаниями тория, а также отдельными зернами фосфатов иттрия, РЗЭ-силикатов и РЗЭ-оксидов. Некоторые из выявленных РЗЭ фаз показаны на рис. 6.

Геохимические особенности почв

К сожалению, из-за имеющихся ограничений по объему статьи у нас нет возможности привести численные данные химического состава проб почв,

собранных в районах исследований в табличном виде. Более того, даже в описательном виде мы имеем возможность привести результаты лишь по некоторым из определявшихся элементов. Напомним, что всего в трех исследованных районах было собрано 56 проб почв, в каждой из которых определялось 74 элемента. В полученном массиве данных в первую очередь нас интересовали содержания редкоземельных элементов, поскольку, с нашей точки зрения, именно эта группа элементов чаще всего ответственна за возникновение у животных стремления к геофагии.

Перед проведением статистической обработки полученных содержаний РЗЭ пробы из каждого района были разделены на две группы: в одну вошли пробы, собранные непосредственно на кудурах или в относительной близости от них, во вторую – пробы, отобранные на различном удалении от кудуров. Так, по району Буотама количество проб вблизи кудуров получилось 11, а на удалении – 7. При этом среднее значение по РЗЭ (включая Sc и Y) в первой группе получилось 86,5 г/т при разбросе значений от 72,8 до 101,0, во второй группе – 51,2 г/т с разбросом от 35,1 до 67,4.

Аналогичная картина по соотношению содержаний РЗЭ в пробах почв получилась и в районе Амга. Среднее значение сумм РЗЭ в 10 пробах почв Амги вблизи кудуров – 81,1 г/т при разбросе от 72,3 до 89,2, а в 11 пробах почв, собранных в отдалении от кудуров, среднее значение сумм РЗЭ – 50,3 г/т при разбросе от 12,0 до 79,4.

В районе Восточная Хандыга в 4 пробах почв в непосредственной близости от кудуров среднее значение сумм РЗЭ получилось 45,7 г/т при разбросе от 23,6 до 58,2, в 13 пробах почв, собранных в отдалении от кудуров, это значение – 27,9 г/т при разбросе от 3,55 до 50,2. В отличие от проб почв, собранных в равнинной части Якутии, пробы из горной части территории показали самые низкие содержания РЗЭ. Среднее по суммам РЗЭ во всех пробах почв по району Восточная Хандыга составляет всего 32,1 г/т. Среднее по всем пробам Якутии – 57,12, в том числе только по лантаноидам – 50,46 г/т.

Для более полной геохимической характеристики почв в исследованных районах Якутии приведем еще данные по содержанию в них Na, а также некоторых важных биофильных и токсичных микроэлементов. Так, средние содержания Na, Se, I и Cd в пробах почв из бассейна р. Буотамы в районе кудуров (11 проб) составляют: 306; 0,48; 0,79 и 0,06 г/т соответственно; а на удалении от кудуров (7 проб) – 126; 0,32; 0,78 и 0,06 г/т. В бассейне р. Амги эти же показатели в районе кудуров (10 проб) – 275; 0,64; 0,96 и 0,07 г/т; на удалении от кудуров (11 проб) – 214; 0,60; 1,03 и 0,05 г/т. В бассейне р. Восточной Хандыги среднее по Na во всех 17 пробах – 43 г/т; по Se – 0,30; по I – 0,74 и по Cd – 0,10 г/т. Из этих данных вполне очевидно, что в районах кудуров в почвах отмечается в разной степени повышенное содержание Na. По остальным выбранным, как и по остальным определявшимся микроэлементам таких различий не выявлено. Что касается вопроса обеспеченности животных другими жизненно важными химическими элементами, то его разберем в следующем разделе, который посвящен химическому составу растительности. В нашем случае это разные виды осок, являющихся существенным компонентом в меню кормов растительноядных млекопитающих.

Биогеохимия

Результаты анализа по РЗЭ в осоках по характерным районам приводятся в виде диаграмм NASC-нормированных содержаний, совмещенных с диаграммами РЗЭ в почвах (рис. 7). При этом часть диаграмм по пробам осок показать не получилось в связи с тем, что значения в них большинства представителей ТРЗЭ были меньше предела обнаружения. Очевидно, что содержания РЗЭ в пробах осок из районов Буотама и Амга практически идентичны, а в большинстве проб из района Восточная Хандыга они заметно ниже.

В табл. 4–6 приводится содержание некоторых главных элементов в пробах осок, собранных в трех районах исследований, а также важнейших биофильных и токсичных микроэлементов.

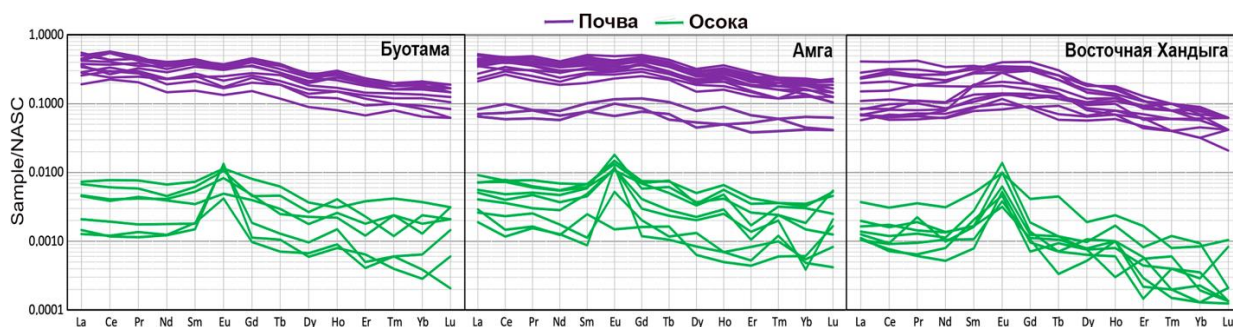


Рис. 7. Диаграммы NASC-нормированных содержаний РЗЭ в почвах и осоках исследованных районов
Fig. 7. Diagrams of NASC-normalized REE contents in soils and sedges of the studied areas

Таблица 4. Содержание некоторых элементов в пробах осок из района Буотама (г/т)

Table 4. Content of some elements in sedge samples from the Buotama area (g/t)

№ пробы/Sample no.	Fe	Mn	Mg	Ca	K	Na	P	Cl	I	Co	Se	As	Cd
1	133	190	4709	2442	18579	2022	1620	10513	2,689	0,154	0,354	0,177	0,032
1-2	36,6	137	1353	1682	28832	974	2729	6290	0,339	0,095	0,365	0,006	0,418
1-3	80,6	87,7	1415	3697	20424	851	2242	9638	0,035	0,085	0,005	0,016	0,042
1-4	344	49,7	1726	5210	12248	280	1526	3350	0,368	0,234	0,456	0,105	0,016
1-5	52,2	23,8	919	1571	11718	63,8	1791	8046	0,244	0,035	0,061	0,033	0,006
1-6	721	131	3943	2139	13487	1300	1867	11704	16,5	0,406	3,61	0,764	0,010
2	57,9	46,7	2257	4837	20042	500	1457	20480	0,202	0,032	0,343	0,043	0,004
55	60,1	65,4	2145	5551	21099	608	3018	4316	0,221	0,036	0,456	0,028	0,024
56	249	55,4	1591	5070	11951	687	4259	1847	0,101	0,166	0,293	0,067	0,034
57	61,2	49,8	2104	6783	13304	221	961	12767	1,48	0,030	0,523	0,037	0,007
57-1	152	23,7	1893	3434	15063	301	1837	3195	0,417	0,090	0,180	0,052	0,017
59	376	44,4	1223	2513	11420	177	1609	5866	0,389	0,283	0,093	0,107	0,014
59-1	118	158	1578	5149	14692	451	205	4283	0,200	0,101	1,34	0,158	0,034
Среднее/Mean	188	81,7	2066	3852	16374	649	1932	7869	1,78	0,13	0,62	0,12	0,05

Таблица 5. Содержание некоторых элементов в пробах осок из района Амга (г/т)

Table 5. Content of some elements in sedge samples from Amga district (g/t)

№ пробы/Sample no.	Fe	Mn	Mg	Ca	K	Na	P	Cl	I	Co	Se	As	Cd
47	149	62,12	1739	3495	15225	119	2362	4530	0,136	0,116	0,582	0,132	0,009
47-2	37,2	19,11	831	1983	12898	8,68	987	1523	0,016	0,015	0,255	0,022	0,006
47-1	325	171	2438	5162	15447	55,8	2356	5472	0,044	0,276	0,247	0,084	0,007
48	317	62,4	2248	3243	19747	92,5	3228	9269	0,180	0,231	0,178	0,133	0,003
49	64,3	14,16	777	1053	14486	10,5	1280	579	0,181	0,054	0,026	0,026	0,028
49-1	32,3	37,61	1400	2920	16125	8,04	3842	2687	0,101	0,021	0,186	0,003	0,009
50	158	79,7	1950	2943	11600	112	3361	1851	0,275	0,125	0,286	0,057	0,016
52	254	98,9	1997	3510	10938	40,7	3462	2108	0,310	0,173	0,323	0,135	0,005
52-1	54,4	20,38	1538	2408	17757	27,3	1895	129	0,119	0,027	0,005	0,018	0,005
52-2	142	31,2	2020	6268	11304	13,2	1789	2990	0,364	0,108	0,177	0,054	0,028
1-1	75,3	38,14	2049	3046	14212	461	1647	5828	0,139	0,043	0,053	0,024	0,037
1	281	132	1171	2245	9971	1651	1754	6245	0,036	0,209	0,098	0,107	0,022
2	88,9	35,06	4647	3035	10523	360	2123	6815	0,103	0,016	0,265	0,019	0,009
3	40,3	30,48	2384	2957	20209	13,0	2963	6214	0,219	0,077	0,237	0,032	0,021
4	64,5	40,90	1702	2821	10151	9,05	2368	2225	0,112	0,035	1,151	0,008	0,013
4-1	34,0	210	998	2295	15421	16,0	2607	1378	0,526	0,045	0,109	0,029	0,015
4-2	31,9	16,88	839	1486	11483	17,4	1210	292	0,108	0,016	0,076	0,008	0,002
5	49,0	95,2	1285	2553	24146	34,0	2361	927	0,166	0,048	0,089	0,016	0,031
6	43,9	22,9	848	2032	8707	13,4	1262	812	0,191	0,032	0,045	0,011	0,006
Среднее/Mean	118	64,1	1729	2919	14229	161,2	2256	3257	0,18	0,088	0,23	0,048	0,014

Примечание. В расчет среднего не включены три пробы по натрию.

Note. Three samples for sodium are not included in the calculation of the mean.

Таблица 6. Содержание некоторых элементов в пробах осок из района Восточная Хандыга (г/т)

Table 6. Content of some elements in sedge samples from the Vostochnaya Khandyga area (g/t)

№ пробы/Sample no.	Fe	Mn	Mg	Ca	K	Na	P	Cl	I	Co	Se	As	Cd
31	79,2	208	1699	6377	17504	134	1776	3977	0,118	0,073	0,049	0,049	0,041
32	86,3	21,4	1232	3629	16296	39,6	1319	1686	0,076	0,042	0,098	0,037	0,002
33	80,4	25,5	1595	4676	24353	43,2	1800	4138	0,101	0,032	0,005	0,020	0,001
34	295	164	1019	2239	16380	75,0	2067	10228	0,111	0,225	0,111	0,187	0,027
35	50,1	106	1542	2270	17053	114	1988	8325	0,018	0,040	0,005	0,008	0,008
35-1	87,2	43,8	1673	2282	17478	53,9	1322	7213	0,046	0,046	0,005	0,048	0,013
36	71,2	40,7	683	2227	13237	118	1267	2001	0,137	0,039	0,141	0,032	0,021
36-1	53,0	390	1090	1685	22631	32,4	2173	20363	0,072	0,029	0,005	0,015	0,061
36-2	170	57,7	2434	2216	25680	48,0	2633	4645	0,043	0,112	0,005	0,122	0,005
38	65,1	18,3	1265	4755	11847	35,5	998	744	0,103	0,028	0,005	0,035	0,001
39	71,7	404	746	847	19290	1,73	2086	6171	0,092	0,202	0,084	0,056	0,036
41	49,8	34,3	1624	2539	35216	43,0	3507	7971	0,084	0,024	0,055	0,055	0,002
41-1	92,6	474	1244	1718	16966	46,9	1695	10568	0,112	0,064	0,188	0,148	0,015
42	86,5	120	1468	3381	20812	18,1	2104	5030	0,064	0,065	0,084	0,094	0,009
46	66,6	33,4	1546	3167	11586	21,5	971	1153	0,462	0,038	0,108	0,061	0,011
Среднее/Mean	93,6	142	1391	2934	19089	55	1847	6281	0,109	0,071	0,06	0,064	0,016

По содержанию Na в пробах осок, собранных в Якутии, резко выделяется в сторону повышенных значений район Буотама со средним показателем по 13-ти пробам – 649 г/т. Резко заниженные показатели характерны для района Восточная Хандыга со средним содержанием по 15-ти пробам 55 г/т. В районе Амга среднее содержание Na в 19-ти пробам осок (161 г/т) занимает промежуточное положение.

Среди полученных данных по бассейну р. Буотамы следует отметить пробу осоки № 1–6 (табл. 4), которая отобрана в пойме ручья в подножии склона, в верхней части которого на расстоянии около 100 м находится кудур Б1 (рис. 1, В). В данной пробе определены существенно повышенные содержания Na (1300 г/т), а также повышенные (на порядок и более) значения по Fe, Mn, Se, I. Недалеко от места отбора этой растительной пробы, судя по наличию охристых выделений на дне текущего рядом небольшого ручья, выходят минерализованные родниковые воды с повышенным содержанием данных элементов, однако признаков их использования животными мы не обнаружили. Данный факт может указывать на то, что ни натрий, ни какие-либо другие элементы, имеющиеся в повышенных концентрациях в родниковой воде и в местной растительности, не являются теми, что ищут животные в потребляемых грунтах на кудуре Б1, поскольку их содержания в таких грунтах заметно ниже.

Содержание некоторых из определявшихся, но не приведенных в таблицах элементов в пробах осок по районам приведем ниже в порядке уменьшения в виде средних значений и пределов их колебаний. При этом по районам Буотамы и Амга ряды получились более близкими как по последовательности, так и по средним значениям элементов, в сравнении с районом Восточная Хандыга (в г/т на воздушно сухое состояние).

Буотама: Br – 74,5 (11,1...470); Sr – 47,1 (10,4...63,6); Zn – 13,6 (3,98...33,3); Cu – 6,28 (2,35...10,6); Ni – 1,49 (0,20...5,69); Mo – 1,13 (0,66...1,89); V – 0,73 (0,066...5,77); Li – 0,215 (0,102...0,396); Pb – 0,169 (0,036...0,432); Co – 0,13 (0,03...0,406); Th – 0,056 (0,009...0,175); U – 0,015 (0,0019...0,0069); Sb – 0,005 (0,002...0,061).

Амга: Br – 24,9 (2,01...101,6); Sr – 18,4 (7,15...44,2); Zn – 16,3 (4,65...27,0); Cu – 5,51 (2,30...10,4); Ni – 0,95 (0,22...2,63); Mo – 0,63 (0,097...1,57); V – 0,25 (0,009...0,622); Li – 0,238 (0,0042...0,903); Pb – 0,078 (0,017...0,202); Th – 0,031 (0,003...0,129); U – 0,019 (0,0002...0,121); Sb – 0,0023 (0,0001...0,0049).

Восточная Хандыга: Zn – 24,3 (11,6...39,8); Sr – 21,8 (11,0...53,5); Cu – 8,05 (2,78...7,88); Br – 5,28 (1,55...14,6); Ni – 1,23 (0,153...2,94); Pb – 0,68 (0,041...5,99); Mo – 0,32 (0,081...1,19); Li – 0,092 (0,037...0,337); V – 0,081 (0,026...0,308); Th – 0,012 (0,00005...0,066); Sb – 0,012 (0,0024...0,023); U – 0,002 (0,0001...0,0051).

Кислотные вытяжки

Содержание основных макроэлементов в солянокислой вытяжке (HCl, pH-2,0) из суглинков, потребляемых животными на кудурах, представлено в табл. 7. Максимальный выход в вытяжку наблюдается (в порядке уменьшения) по Ca, Mg, Na, Mn, P и Fe. Детальный разбор полученных результатов будет проведен в следующей главе. Здесь лишь отметим, что выход Na в вытяжку получился очень неоднородным, размах колебаний десятикратный.

Таблица 7. Выход макроэлементов в вытяжку (HCl, pH-1) из кудуритов Якутии (г/кг)

Table 7. Macroelements output in extract (HCl, pH-1) from Yakutian kudurites (g/kg)

№ пробы/Sample no.	Fe	Mn	Ca	Mg	Na	P
Б1-1	0,0002	0,005	4,124	1,251	0,465	0,007
Б1-2	0,0003	0,007	3,949	1,769	0,105	0,004
Б3	0,0004	0,015	5,323	1,756	1,020	0,003
Б4	0,0002	0,009	4,484	1,580	0,248	0,003
А1-4	0,002	0,039	5,693	2,931	1,653	0,005
А2-2	0,006	0,028	6,062	2,346	2,482	0,014
Х1-4	0,001	0,015	7,127	6,404	0,371	0,002
Х2-2	0,088	0,078	0,756	0,085	0,305	0,124

Среди микроэлементов наиболее существенный и стабильный выход в солянокислую вытяжку из всех проб кудуритов наблюдается по редкоземельным элементам (Y, La, Ce, Pr, Sm), что хорошо видно на диаграммах (рис. 8, А–С). Результаты даны в мкг на 100 г кудурита. В вытяжках из некоторых проб отмечаются высокие содержания Sr (от 1446 до 2095) и Ba (от 1472 до 3497), а также Zn (от 46,8 до 387,3), Cu (от 17,9 до 220,8), Co (от 29,6 до 189,4), Ni (от 78,1 до 172,0) и Pb (от 4,64 до 416,0), что также хорошо видно на рис. 8 (значения Sr и Ba на рисунке не отражены). Разбор полученных результатов по микроэлементам также будет проведен в следующей главе.

Обсуждение

В результате проведенных на характеризующей территории Якутии ландшафтно-геохимических исследований нам удалось выявить факты, значимые для выяснения причин геофагии.

1. Животные на всех изученных кудурах поедают суглинистые грунты с долей глистой фракции от 20 до 35 % в виде гидрослюд, хлоритов, смектитов и каолинита, формируемые по разновозрастным терригенным отложениям. Вместе с тем не исключено, что во многих случаях поедаемые породы сформировались с участием или непосредственно по лёссовидным отложениям, которые накапливались на обширных пространствах в Якутии в плейстоцене.

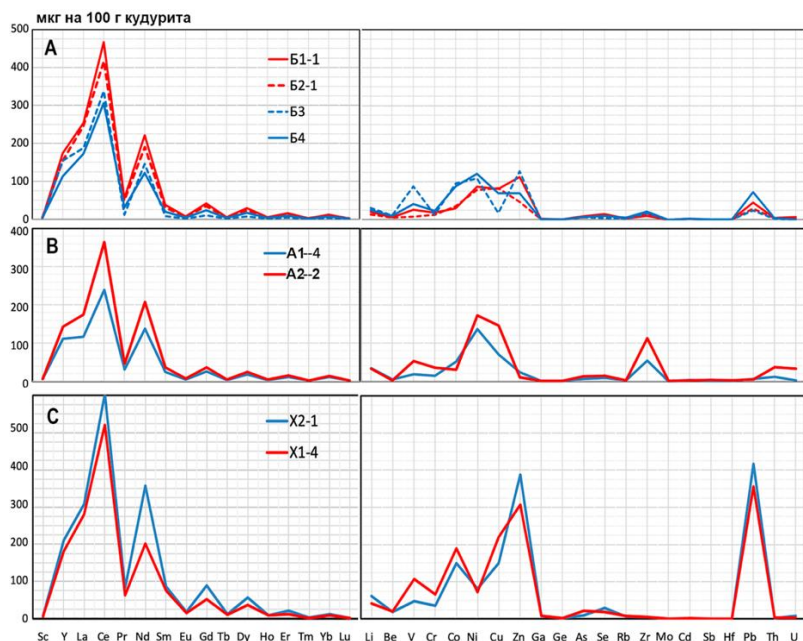


Рис. 8. Диаграммы содержания РЗЭ и других микроэлементов в вытяжке из кудуритов районов Буотамы (А), Амга (В) и Восточная Хандыга (С)

Fig. 8. Diagrams of REE and other trace element contents in extracts from kudurites from Buotama (A), Amga (B) and Vostochnaya Khandyga (C) districts

- Во всех исследованных нами районах Якутии, где встречаются кудуры, природные воды, почвы и кормовая растительность оказались существенно обедненными редкоземельными элементами. Природные воды обеднены приблизительно на два порядка относительно средних показателей для речных вод мира по [23], почвы относительно кларка для почв мира по [24] обеднены втрое. По содержанию большинства других микроэлементов в кормовых травах, если судить по данным исследований микроэлементного состава кормовых растений Якутии [25], такие районы ничем особо не выделяются.
- Важная геохимическая специфика местных кудуритов заключается в том, что для них почти всегда характерны повышенные содержания легкоподвижных катионов Ca, Mg и Na, а также подвижных в кислой среде РЗЭ легкой подгруппы. Благодаря этой особенности подавляющее большинство изученных нами кудуритов можно отнести к слабозасоленным грунтам.

Попытки выявления причин геофагии среди копытных в Якутии до наших исследований осуществлялись только с позиции натриевой гипотезы. Так, Р.В. Десяткиным [26] был изучен химический состав (макрокомпоненты) водных вытяжек в трех образцах кудуритов, собранных на гидроморфных кудурах в бассейне р. Б. Черепанихи в Олёкминском районе. Сумма солей в вытяжках колебалась от 0,17 до 0,24 %, при этом содержание Na составляло от 0,18 до 0,76 г/кг. В группе катио-

нов в двух пробах кудуритов преобладал Na, в третьей пробе – Ca. По анионному составу вытяжки оказались гидрокарбонатно-хлоридными и гидрокарбонатно-сульфатно-хлоридными. В итоге этим исследователем был сделан вывод о том, что животных привлекают засоленные грунты с повышенным содержанием натрия, что объяснено низкими содержаниями данного элемента в местных ландшафтах.

Попробуем и мы оценить полученные нами данные по кислотным вытяжкам с позиции натриевой гипотезы. Для этого сначала напомним, что суточная норма для полноценного восполнения запаса Na в организме крупного рогатого скота в расчете на NaCl составляет от 5 до 10 г на 100 кг веса животного [27]. Значит, в сутки корова потребляет минимум 5 г чистого натрия в расчете на 100 кг веса. Взрослый олень весом в 100 кг такое количество Na получит при максимальном содержании в кудурите доступного для организма элемента в 2,5 г/кг если потребит около 2 кг глинистой породы. В худшем случае при содержании доступного Na в кудурите около 0,1 г/кг (приблизительно столько же элемента обычно содержится в среднем в большинстве местных почв и растительности) дневную норму Na олень сможет получить, потребив не менее 50 кг кудурита. При содержании Na в кудурите 0,5 г/кг оленю понадобится его потребить около 10 кг. Из этих простых расчетов вполне очевидно, что компенсировать дефицит Na в диете животным за счет кудуритов нет смысла, если они

будут поглощать грунты с содержаниями искомого элемента приблизительно такими же, как в окружающих почвах и растительности. Отсюда закономерен вывод о том, что натриевый голод не может рассматриваться в качестве универсальной причины геофагии. Если судить по соотношению Na в кудуритах и растительности, то «натриевая» причина геофагии явно просматривается только в районе Восточная Хандыга, где содержание Na в кудуритах на порядок превышает средние показатели элемента в местных почвах и растительности.

Разбирая вопрос о натрии, следует напомнить известный факт о том, что животные могут потреблять глинистые породы для того, чтобы нормализовать консистенцию экскрементов в период перехода с грубых зимних кормов на зеленые летние [13, 14, 28]. В весенний период, как известно, у животных может наблюдаться разжижение экскрементов, что, собственно, ведет к потере организмом натрия. В то же время известно, что для остановки диареи в медицине и ветеринарии применяются минеральные сорбенты на основе самых разных глин (каолинитовых, галлузитовых, смектитовых и др.). Оценивая данные факты, необходимо признать, что стремление остановить диарею, несомненно, может выступать в качестве причины потребления глин животными. В то же время наши многолетние наблюдения в местах активной геофагии в разных районах Сибири и Дальнего Востока не указывают на единственно возможную связь стремления животных к геофагии с проявлениями диареи. Среди аргументов против использования глин животными исключительно в качестве антидиарейного средства укажем, что разжижение экскрементов у растительноядных животных происходит только в весенний период и распространено практически повсеместно, а глину на кудурах они поедают в течение всего лета и даже осенью. И только в отдельных районах. Причем и в таких районах, где содержание натрия в растительности не самое низкое.

При объяснении причины геофагии правомерно также суждение о том, что животные могут искать в кудуритах не только натрий, но и другие макроэлементы, среди которых Ca, Mg, Fe, Mn, S. В отношении этих элементов нами ранее неоднократно показано [9–11], что все они также не могут претендовать на роль искомым животными в глинистых породах с позиций исчерпывающего объяснения причины геофагии. Противоречат этой концепции и результаты анализа собранных нами в исследуемых районах проб растительности, показавшие вполне типичные, широко распространенные на территории Якутии содержания в них перечисленных макроэлементов.

Не наблюдается в исследованных ландшафтах и особого перекаса в соотношении Ca/P в кормах.

Этот показатель в осоках исследуемых районов колеблется в среднем от 1,3 до 2 при норме в кормах КРС около 1,5 [29].

По содержанию большинства микроэлементов местные почвы и кормовая растительность также геохимически маловыразительны. Дефицит в почвах заметно проявляется только по йоду (I) – элементу, недостаток которого в пище вызывает серьезные нарушения в работе щитовидной железы у животных и человека. Содержание его в почвах по районам колеблется от 0,74 до 0,96 при норме в пределах 2,5–10 г/т [30]. В то же время, как было показано ранее, резкая положительная аномалия по содержанию йода в районе отбора пробы осоки № 1–6 с содержанием йода 16,5 г/т (табл. 8) и натрия 1,3 г/кг (табл. 7) оказалась никак не проявленной в следовой активности животных. Между тем, в сотне метрах от этого места животные активно поедают суглинки на кудуре № 1 с относительно низким содержанием йода (0,56 г/т) и натрия в вытяжке около 0,47 г/кг.

Среди микроэлементов для нормального самочувствия животных особое значение имеет селен (Se). При его недостатке в организме развивается беломышечная болезнь – тяжелое заболевание, характеризующееся выраженной дистрофией скелетных мышц, печени и других органов. Беломышечная болезнь возникает при содержании селена менее 0,1 г/т сухого вещества корма [31]. Избыток Se в кормах также негативно отражается на состоянии животных. При содержании селена в корме от 5 до 10 г/т возникает задержка роста и развития молодняка сельскохозяйственных животных, а при наличии от 10 до 30 г/т фиксируется хроническое отравление [32].

Средние содержания Se в осоках исследуемых районов 0,06 г/т (район Восточная Хандыга); 0,23 (район Амга) и 0,62 (район Буотама) при колебании значений от <0,005 г/т (ниже предела обнаружения) до 3,61 г/т. То есть проблемы с обеспеченностью этим элементом у диких копытных если и вероятны, то только в одном из исследованных районов – Восточная Хандыга. На усвояемость Se из кормов негативное влияние могут оказывать содержащиеся в корме тяжелые металлы, такие как ртуть, свинец и кадмий [33]. По ртути мы не располагаем данными. Средние относительно низкие содержания Pb в осоках исследуемых районов, варьирующие от 0,08 до 0,8 г/т, и Cd от 0,01 до 0,05 г/т свидетельствуют о том, что влияние этих элементов на усвояемость Se из кормов не существенно.

Сравнительно недавно стало известно, что к микроэлементам, недостаток или избыток которых в пище и питьевой воде способны оказывать существенное влияние на здоровье и самочувствие животных, относятся некоторые редкоземельные ме-

таллы. Для нас РЗЭ особенно интересны, поскольку ранее при изучении многих случаев массовой геофагии в разных районах Сибири и Дальнего Востока мы неоднократно убеждались, что именно эта группа элементов является ключевой в объяснении феномена геофагии [9–12].

Своими исследованиями в Якутии мы выяснили, что среднее значение по суммам лантаноидов (РЗЭ без Sc и Y) в почвах исследуемых районов составляет около 50 г/т при разбросе значений от 28 г/т (Восточная Хандыга) до 65 г/т (Буотама). Эти показатели существенно ниже средних значений сумм лантаноидов по почвам стран мира. Так, средний показатель по почвам Бразилии – 107,5 г/т, Японии – 98,4 г/т, Китая – 154,6 г/т, Швеции – 89,3 г/т, в среднем по странам Европы – 125,3 г/т [34]. Суммарный кларк лантаноидов в почвах мира, по данным Н.Н.М. Bowen [24], – 153,2 г/т. Содержание лантаноидов в растительности в исследованных районах Якутии тоже низкое. Во многих пробах значения по ряду элементов ниже порога обнаружения используемого метода плазменной спектроскопии. В этой связи возникает закономерное предположение, что причина геофагии у животных в исследованных районах Якутии, так же как на острове Ольхон [11] и других районах мира, где преобладают обедненные РЗЭ породы, может быть обусловлена недостаточным поступлением в организм каких-либо РЗЭ в составе кормов и питьевой воды. К наиболее широко распространенным породам, обедненным РЗЭ, относятся, как известно, осадочные и органогенные карбонатные разности [35].

Накопленный опыт использования РЗЭ в медицине и в практике кормления животных (обзоры [8, 36] свидетельствует о том, что биологически значимыми (для млекопитающих во всяком случае) элементами среди РЗЭ являются представители легкой подгруппы (La, Ce, Pr, Nd), а также Y). В последние десятилетия интерес к применению ЛРЗЭ при откорме различных животных активно нарастает. Все ТРЗЭ (кроме Y), которые также могут встраиваться в биологические ткани, замеща в них легкие аналоги, похоже, токсичны для всех позвоночных. Ряд исследователей [37] экспериментально установили, что в желудочно-кишечном тракте всасывается лишь незначительное количество применяемых перорально РЗЭ из их минеральных и органоминеральных форм. Тем не менее эти же исследователи фиксируют эрготропные эффекты ЛРЗЭ-подкормок в виде существенного увеличения прироста массы тела и улучшения ассимиляции корма. Выявлены также факты влияния таких добавок на активность ферментов и гормонов (в том числе щитовидной железы и эпифиза), на изменение ряда параметров крови и межклеточных

жидкостей [38]. В связи со сказанным авторы склонны полагать, что значительные биологические эффекты могут вызываться даже низкими дозами попадающих в кровь ЛРЗЭ.

Сильное воздействие малых доз РЗЭ на центральную нервную систему животных показано, в частности, в экспериментах на крысах. Так, применение солей Y в диете в водорастворимой форме [36], как и солей La в виде добавки к пище [39], меняет в тканях головного мозга крыс распределение Ca, Zn, Mn, Fe, Ni и Co. Такой эффект, по мнению исследователей, приводит в итоге к изменению физиологических функций.

Наиболее полный перечень уже достоверно выявленных биологических эффектов от применения добавок ЛРЗЭ в меню животных приводят китайские исследователи [40]. В зависимости от дозы препарата может наблюдаться ряд процессов: стимулирование или ингибирование роста организмов, пролиферации клеток, апоптоза; антиоксидантная или прооксидантная активность; стабилизация или дестабилизация цитоскелета; повышение или подавление проницаемости клеток; положительная или отрицательная регуляция клеточной сигнальной системы; увеличение или уменьшение сродства гемоглобина к кислороду; усиление минерализации или деминерализация. По сути, сказанное напрямую подтверждают возможность возникновения проблем со здоровьем у животных при обитании в ландшафтах как с избытком, так и с недостатком в кормах нужных для их организма РЗЭ.

Из приведенного краткого обзора биологических эффектов, связанных с РЗЭ, вполне закономерно, что значимость таких эффектов в организме даже от небольших доз таких элементов у специалистов сомнений не вызывает. С некоторых пор вопрос их усвоения в организме также решается положительно. Вместе с тем следует отметить, что потребление землистых веществ животными может быть сопряжено с возможностью возникновения и токсических эффектов, что очевидно по данным исследования глинистых грунтов, потребляемых человеком [41–43].

Таким образом, в результате выполненных исследований мы можем сделать вывод о том, что причиной потребления растительными животными в исследованных районах Якутии глинистых пород, относительно обогащенных ЛРЗЭ, вполне может быть недостаток поступления в организм животных с кормами и питьевой водой редкоземельных элементов легкой подгруппы. От этого возможен дисбаланс таких элементов в организме, в первую очередь, в нервной и гормональной системах. Разбалансировка упомянутых систем в организме вполне может сопровождаться специфическим стрессом. В связи с относительно слабой выраженностью геофагии в

Якутии позволительно допустить, что нарушения в организме животных, связанные с расстройством обмена РЗЭ у местных животных, не сильно выражены и не носят массового характера.

В качестве второй дополнительной версии, имеющей явно подчиненное значение для объяснения геофагии в исследуемых районах, правомерно допущение о стремлении животных на фоне РЗЭ-стресса получить дефицитный натрий. Причем в данном случае соли натрия могут работать как аналоги солей лития, применяемые для снятия избыточного возбуждения ЦНС в медицине. Глинистые кудуриты могут останавливать также диарею в ограниченный период сезонной смены кормового рациона. Не исключено, что все эти составляющие биологического действия кудуритов вносят свой вклад в стремление животных потреблять минеральные вещества на кудурах.

Полученные материалы по кудурам Якутии с учетом всей собранной нами информации по геофагии все более убедительны в том, что давно сложившееся представление о главной причине этого необычного пищевого поведения – недостатке в диете натрия и других макроэлементов – является по меньшей мере неточным. Первостепенная, можно сказать универсальная, причина феномена геофагии – это нарушения в нейроиммунноэндокринной системе млекопитающих в РЗЭ-аномальных (РЗЭ-депрессивных) ландшафтах. Кудуры, которые животные посещают только для пополнения в организме запасов Na (как в случаях с искусственными солонцами), разумеется, тоже встречаются в природных ландшафтах. Однако, как показывает наш многолетний исследовательский опыт по разным регионам, – весьма редко. Натрий, содержащийся в кудуритах, для животных в большинстве случаев имеет лишь подчиненное значение. Соли Na (особенно карбонатные), концентри-

руясь на сорбционных и испарительных барьерах и определяя щелочную среду на локальных участках обнажений скальных пород, способствуют образованию глинистых минералов с высокими сорбционными свойствами, тем самым создаются условия для появления на их основе кудуров в РЗЭ-аномальных ландшафтах. Связь между РЗЭ и Na в кудуритах может заключаться также в том, что потребление кудуритов с повышенным содержанием Na (такие встречаются в 50–70 % случаев) позволяет животным решать не столько проблему восстановления баланса Na в организме, сколько с помощью этого элемента снижать степень возбуждения центральной нервной системы в условиях РЗЭ-стресса.

Заключение

На территории Якутии, в бассейнах рек Буотамы, Амги и Восточной Хандыги, проведены ландшафтно-геохимические исследования с целью объяснения причины феномена геофагии, встречающегося среди растительноядных животных. В составе природных вод на исследованных территориях выявлены существенно пониженные, относительно регионального и общемирового фона, содержания РЗЭ. Особенностью химического состава местных почв также является низкий уровень содержаний РЗЭ относительно почв мира. В составе поедаемых животными суглинков определены в разной степени повышенные содержания глинистых минералов, кальций-натриевых солей, а также повышенные содержания РЗЭ, легко извлекаемых в кислой среде. Выявленные факты дают нам право полагать, что основная причина геофагии у животных вызвана стремлением избавиться от РЗЭ-стресса, вызванного разбалансировкой работы нервной и эндокринной систем в их организме из-за низких содержаний этой группы элементов в диете.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pottie S., Bello R., Shanee S. Geophagy in large-headed capuchin monkeys (*Sapajus apella macrocephalus*) in the Reserva Nacional Tambopata, Peru // *Primates*. – 2023. – Vol. 64. – P. 381–387. DOI: 10.1007/s10329-023-01058-9
2. Willrich G. Geophagy by birds on *Furnarius rufus* nests // *Ornithology Research*. – 2022. – Vol. 30. – P. 221–224. DOI: 10.1007/s43388-022-00097-y
3. Molale T.L., Eze P.N. Human geophagy (soil ingestion): biochemical functions and potential health implications // *Health and Medical Geography in Africa. Global Perspectives on Health Geography*. – 2023. – P. 367–385. DOI: 10.1007/978-3-031-41268-4_17
4. Physical, landscape, and chemical properties of Amazonian interior forest mineral licks / B.M. Griffiths, Y. Jin, L.G. Griffiths, M.P. Gilmore // *Environmental Geochemistry and Health*. – 2023. – Vol. 45. – P. 3263–3276. DOI: 10.1007/s10653-022-01412-8
5. Drivers of geophagy by red brocket deer (*Mazama americana*) at amazonian interior forest mineral licks / B.M. Griffiths, L.G. Griffiths, Y. Jin, M.P. Gilmore // *Ecology and Evolution*. – 2024. – Vol. 14. – P. 10968. DOI: 10.1002/ece3.10968
6. Mineral supplementation by artificial salt licks is comparatively effective as natural salt licks for Malaysian mammals / N.B. Razali, M.S. Mansor, F.A. Farinordin, M.I.A. Zaini, S.H.A. Razali, P.A. Patah, S.M. Husin, M.S.R. Hussein, S.M. Nor // *Ecological Processes*. – 2025. – Vol. 14. – P. 2. DOI: 10.1186/s13717-024-00564-y
7. Geophagy and geology of mineral licks (kudurs): a review of Russian publications / A.M. Panichev, K.S. Golokhvast, A.N. Gulkov, I.Yu. Chekryzhov // *Environmental Geochemistry and Health*. – 2013. – Vol. 1. – P. 133–152. DOI: 10.1007/s10653-012-9464-0
8. 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. – Vol. 9. – P. 95–103. DOI: 10.1016/j.als.2015.12.001

9. Landscape REE anomalies and the cause of geophagy in wild animals at kudurs (mineral salt licks) in the Sikhote-Alin (Primorsky Krai, Russia) / A.M. Panichev, N.V. Baranovskaya, I.V. Seryodkin, I.Yu. Chekryzhov, E.A. Vakh, B.R. Soktoev, A.I. Belyanovskaya, R.A. Makarevich, T.N. Lutsenko, N.Yu. Popov, A.V. Ruslan, D.S. Ostapenko, A.V. Vetoshkina, V.V. Aramilev, A.S. Kholodov, K.S. Golokhvast // *Environmental Geochemistry and Health*. – 2021. – Vol. 44. – № 3. – P. 1137–1160. DOI: 10.1007/s10653-021-01014-w
10. Excess of REE in plant foods as a cause of geophagy in animals in the Teletskoye Lake basin, Altai Republic, Russia / A. Panichev, N. Baranovskaya, I. Seryodkin, I. Chekryzhov, E. Vakh, Yu. Kalinkin, T. Lutsenko, N. Popov, A. Ruslan, D. Ostapenko, E. Elovskiy, A. Vetoshkina, O. Patrusheva, R. Makarevich, Yu. Manakov, A. Kholodov, D. Spandidos, A. Tsatsakis, K. Golokhvast // *World Academy of Sciences Journal*. – 2023. – Vol. 5. – № 1. – P. 1–22. DOI: 10.3892/wasj.2022b.183
11. The main cause of geophagy according to extensive studies on Olkhon Island, Lake Baikal / A.M. Panichev, N.V. Baranovskaya, I.V. Seryodkin, I.Yu. Chekryzhov, B.R. Soktoev, V.V. Ivanov, E.A. Vakh, T.V. Desyatova, T.N. Lutsenko, N.Y. Popov, A.V. Ruslan, E.V. Elovsky, A.V. Vetoshkina, O.V. Patrusheva, D.S. Ostapenko, A.S. Kholodov, K.S. Golokhvast // *Geosciences*. – 2023. – Vol. 13. – P. 211 (1–28). DOI: 10.3390/geosciences13070211.
12. An unusual variety of geophagy: coal consumption by snow sheep in the Transbaikalia Mountains / A.M. Panichev, N.V. Baranovskaya, I.Yu. Chekryzhov, V.V. Ivanov, A.N. Tsatska // *Doklady Earth Sciences*. – 2024. – Vol. 516. – P. 1061–1066. DOI: 10.1134/S1028334X24601639.
13. Allometry of sodium requirements and mineral lick use among herbivorous mammals / E. S. Duvall, B.M. Griffiths, M. Clauss, A.J. Abraham // *Oikos*. – 2023. – Vol. 9. – P. 10058. DOI: 10.1111/oik.10058.
14. Klaus G., Schmid B. Geophagy at natural licks and mammal ecology: a review // *Mammalia*. – 1998. – Vol. 62. – № 4. – P. 482–498.
15. Паничев А.М. Геофагия в мире животных и человека. – М.: Наука, 1990. – 223 с.
16. I like the way you eat it: lemur (*Indri indri*) gut microbiome and geophagy / L. Borruso, A. Checcucci, V. Torti, F. Correa, C. Sandri, D. Luise, L. Cavani, M. Modesto, C. Spiezio, T. Mimmo, S. Cesco, M. di Vito, F. Bugli, R.M. Randrianarison, M. Gamba, N.J. Rarojason, C.A. Zaborra, P. Mattarelli, P. Trevisi, C. Giacoma // *Microbial Ecology*. – 2021. – Vol. 82. – P. 215–223. DOI: 10.1007/s00248-020-01677-5.
17. Banerjee S., Van der Heijden M.G.A. Soil microbiomes and one health // *Nature Reviews Microbiology*. – 2023. – Vol. 21. – P. 6–20. DOI: 10.1038/s41579-022-00779-w.
18. Щербаков О.И., Юганова Л.А. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М 1:200000. Серия Анабаро-Виллюйская. Лист Р-52-XXVII. – СПб.: Изд-во Картфабрики ВСЕГЕИ, 1999.
19. Мозалевский Е.Л. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М 1:200000. Серия Юдомская. Лист Р-54-VIII. – СПб.: Изд-во Картфабрики ВСЕГЕИ, 1996.
20. Бабич А.П., Круковская Л.А. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М 1:200000 (второе поколение). Серия Юдомская. Лист Р-54-VIII. – СПб.: Изд-во Картфабрики ВСЕГЕИ, 2016.
21. Солонцевание лося (*Alces alces* L., 1758, Cervidae, Artiodactyla) в Южной Якутии / В.В. Степанова, Д.И. Тирский, А.В. Аргунов, И.М. Охлопков // *Аграрный вестник Урала*. – 2018. – Vol. 174. – № 7. – С. 52–57.
22. Gaillardet J., Viers J., Dupre B. Trace elements in rivers waters // *Treasure on Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier Pergamon. – 2004. – Vol. 5. – P. 225–272. DOI: 10.1016/B0-08-043751-6/05165-3.
23. Галанин А.А. Позднечетвертичные криопустыни Центральной Якутии // *Фундаментальные проблемы квартара: итоги изучения и основные направления дальнейших исследований: Материалы X Всероссийского совещания по изучению четвертичного периода*. – М.: ГЕОС, 2017. – С. 83–85.
24. Bowen H.J.M. *Environmental chemistry of elements*. – London; New-York; Toronto; Sydney; San-Francisco: Academic Press, 1979. – 250 p.
25. Микроэлементы в почвах и лугопастбищных растениях мерзлотных ландшафтов Якутии / А.Д. Егоров, Д.В. Григорьева, Т.Т. Курилюк, Н.Н. Сазонов. – Якутск: Якутское книжное изд-во, 1970. – 287 с.
26. Десяткин Р.В. «Зверовые» солонцы Юго-Западной Якутии // *Наука и образование*. – 2014. – № 2. – С. 10-14.
27. Менькин В.К. Кормление животных. – М.: Колосс, 2006. – 360 с.
28. Ecke P., Hodgson D.R., Rose R.J. Induced Diarrhoea in horses. P. 1: Fluid and electrolyte balance // *Veterinary Journal*. – 1998. – Vol. 155. – P. 149–159.
29. Ермаков В.В., Тютиков С.Ф. Геохимическая экология животных. – М.: Наука, 2008. – 315 с.
30. Каталымов М.В. Микроэлементы и микроудобрения. – М.: Изд-во «Химия», 1965. – 332.
31. Кондрахин И.П. Алиментарные и эндокринные болезни животных. – М.: Агропромиздат, 1989. – 256 с.
32. Баженов С.В. Ветеринарная токсикология. – Л.: Колос, 1970. – 310 с.
33. Краснощекова Т.А., Перепелкина Л.И., Нимаева В.Ц. Зависимость содержания селена в почве и кормах от уровня ртути, свинца и кадмия, являющихся его антагонистами // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. – 2017. – Vol. 4. – С. 145–148. DOI: 10.18286/1816-45-2017-4-145-148.
34. Rare earth element concentrations in Brazilian benchmark soils / Y.J.A.B. Silva, C.W.A. Nascimento, Y.J.A.B. Silva, C.M. Biondi, C.M.C.A.C. Silva // *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*. – 2016. – Vol. 40. – P. 0150413. DOI: 10.1590/18069657rbcs20150413.
35. Дубинин А.В. Геохимия редкоземельных элементов в океане. – М.: Наука, 2006. – 360 с.
36. Effect of long-term intake of rare earth in drinking water on trace elements in brains of mice / L. Jiesheng, S. Zhiguo, Y. Weidong, C. Jun, X. Limin, L. Hengyi // *Journal of Rare Earths*. – 2002. – Vol. 20. – № 5. – P. 562–564.
37. Hutchison A.J., Albaaj F. Lanthanum carbonate for the treatment of hyperphosphataemia in renal failure and dialysis patients // *Expert Opinion on Pharmacotherapy*. – 2005. – Vol. 6. – № 2. – P. 319–328.
38. He R., Xia Z. Effect of rare earth compounds added to diet on performance of growing-finishing pigs // *Second International Symposium on Trace Elements and Food Chain*, Wuhan, China, 1998. – P. 12–15.
39. Neurotoxicological consequence of long-term exposure to lanthanum / L. Feng, H. Xiao, X. He, Z. Li, F. Li, N. Liu, Y. Zhao, Y. Huang, Z. Zhang, Z. Chai // *Toxicology Letters*. – 2006. – Vol. 165. – P. 112–120.

40. Cell response to lanthanides and potential pharmacological actions of lanthanides in metal ions in biological systems / K. Wang, Y. Cheng, X. Yang, R. Li // *Metal Ions in Biological Systems*. – 2003. – Vol. 40. – P. 707–751.
41. Mouri H., Malepe R.E., Candeias C. Geochemical composition and potential health risks of geophagic materials: an example from a rural area in the Limpopo Province of South Africa // *Environmental Geochemistry and Health*. – 2023. – Vol. 45. – P. 6305–6322. DOI: 10.1007/s10653-023-01551-6.
42. Interactions of clay and clay minerals with the human health / C.S.F. Gomes, M. Rautureau, J.H.C. Gomes, E.A.F. Silva // *Minerals latu sensu and Human Health*. – 2021. – P. 271–375. DOI: 10.1007/978-3-030-65706-2_7.
43. Gevera P.K., Mouri H. Geochemical and mineralogical composition of geophagic materials from Baringo town, Kenyan Rift Valley and their possible health effects on the consumers // *Environmental Geochemistry and Health*. – 2021. – Vol. 43. – P. 4831–4846. DOI: 10.1007/s10653-021-00960-9.

Информация об авторах

Александр Михайлович Паничев, доктор биологических наук, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экологии и охраны животных, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Россия, 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 7. sikhote@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5223-443X>

Наталья Владимировна Барановская, доктор биологических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. nata@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3729-800X>

Иван Владимирович Серёдкин, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экологии и охраны животных, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Россия, 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 7. seryodkinivan@inbox.ru; <http://orcid.org/0000-0003-4054-9236>

Иннокентий Михайлович Охлопков, кандидат биологических наук, директор Института биологических проблем криолитозоны СО РАН, Россия, 677890, г. Якутск, пр. Ленина, 41. imokhlopkov@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6227-5216>

Николай Викторович Мамаев, младший научный сотрудник, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, Россия, 677890, г. Якутск, пр. Ленина, 41. mamaev_88@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5168-4113>

Игорь Юрьевич Чекрѣжов, научный сотрудник лаборатории геохимии, Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Россия, 690022, г. Владивосток, пр. 100 лет Владивостоку, 159. chekr2004@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0319-8759>

Лина Владимировна Жорняк, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. zlv@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4170-1976>

Елена Александровна Вах, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории геохимии, Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Россия, 690022, г. Владивосток, пр. 100 лет Владивостоку, 159. adasea@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6690-6505>

Владимир Викторович Иванов, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией микро- и наноисследований, Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Россия, г. Владивосток, пр. 100 лет Владивостоку, 159. d159327@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7917-9757>

Татьяна Николаевна Луценко, кандидат географических наук, научный сотрудник лаборатории геохимии, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Россия, 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 7. lutsenko53@bk.ru. <https://orcid.org/0000-0002-5433-8248>

Раиса Алексеевна Макаревич, научный сотрудник лаборатории геохимии, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Россия, 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 7. mak@tigdvo.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6787-6870>

Евгений Васильевич Еловский, научный сотрудник лаборатории аналитической химии, Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Россия, г. Владивосток, пр. 100 лет Владивостоку, 159. matri@list.ru

Дмитрий Сергеевич Остапенко, научный сотрудник лаборатории аналитической химии, Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Россия, г. Владивосток, пр. 100 лет Владивостоку, 159. ihsunday888@gmail.com

Алексей Алексеевич Потоскуев, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. alex_pot@list.ru

Дмитрий Александрович Стрепетов, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. das57@tpu.ru; <http://orcid.org/0000-0002-1041-4747>.

Поступила в редакцию: 21.10.2024

Поступила после рецензирования: 15.04.2025

Принята к публикации: 21.05.2025

REFERENCES

1. Pottie S., Bello R., Shanee S. Geophagy in large-headed capuchin monkeys (*Sapajus apella macrocephalus*) in the Reserva Nacional Tambopata, Peru. *Primates*, 2023, vol. 64, pp. 381–387. DOI: 10.1007/s10329-023-01058-9.
2. Willrich G. Geophagy by birds on *Furnarius rufus* nests. *Ornithology Research*, 2022, vol. 30, pp. 221–224. DOI: 10.1007/s43388-022-00097-y.
3. Molale T.L., Eze P.N. Human geophagy (soil ingestion): biochemical functions and potential health implications. *Health and Medical Geography in Africa. Global Perspectives on Health Geography*, 2023, pp. 367–385. DOI: 10.1007/978-3-031-41268-4_17.
4. Griffiths B.M., Jin Y., Griffiths L.G., Gilmore M.P. Physical, landscape, and chemical properties of Amazonian interior forest mineral licks. *Environmental Geochemistry and Health*, 2023, vol. 45, pp. 3263–3276. DOI: 10.1007/s10653-022-01412-8.
5. Griffiths B. M., Griffiths L. G., Jin Y., Gilmore M.P. Drivers of geophagy by red brocket deer (*Mazama americana*) at amazonian interior forest mineral licks. *Ecology and Evolution*, 2024, vol. 14, pp. 10968. DOI: 10.1002/ece3.10968.
6. Razali N.B., Mansor M.S., Farinordin F.A., Zaini M.I.A., Razali S.H.A., Patah P.A., Husin S.M., Hussein M.S.R., Nor S.M. Mineral supplementation by artificial salt licks is comparatively effective as natural salt licks for Malaysian mammals. *Ecological Processes*, 2025, vol. 14, pp. 2. DOI: 10.1186/s13717-024-00564-y.
7. Panichev A.M., Golokhvast K.S., Gulkov A.N., Chekryzhov I.Yu. Geophagy and geology of mineral licks (kudurs): a review of russian publications. *Environmental Geochemistry and Health*, 2013, vol. 1, pp. 133–152. DOI: 10.1007/s10653-012-9464-0.
8. 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, vol. 9, pp. 95–103. DOI: 10.1016/j.als.2015.12.001.
9. Panichev A.M., Baranovskaya N.V., Seryodkin I.V., Chekryzhov I.Yu., Vakh E.A., Soktoev B.R., Belyanovskaya A.I., Makarevich R.A., Lutsenko T.N., Popov N.Yu., Ruslan A.V., Ostapenko D.S., Vetoshkina A.V., Aramilev V.V., Kholodov A.S., Golokhvast K.S. 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, vol. 44, no. 3, pp. 1137–1160. DOI: 10.1007/s10653-021-01014-w.
10. Panichev A., Baranovskaya N., Seryodkin I., Chekryzhov I., Vakh E., Kalinkin Yu., Lutsenko T., Popov N., Ruslan A., Ostapenko D., Elovskiy E., Vetoshkina A., Patrusheva O., Makarevich R., Manakov Yu., Kholodov A., Spandidos D., Tsatsakis A., Golokhvast K. 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*, 2023, vol. 5, no. 1, pp. 1–22. DOI: 10.3892/wasj.2022b.183.
11. Panichev A.M., Baranovskaya N.V., Seryodkin I.V., Chekryzhov I.Yu., Soktoev B.R., Ivanov V.V., Vakh E.A., Desyatova T.V., Lutsenko T.N., Popov N.Y., Ruslan A.V., Elovsky E.V., Vetoshkina A.V., Patrusheva O.V., Ostapenko D.S., Kholodov A.S., Golokhvast K.S. The main cause of geophagy according to extensive studies on Olkhon Island, Lake Baikal. *Geosciences*, 2023, vol. 13, p. 211 (1–28). DOI: 10.3390/geosciences13070211.
12. Panichev A.M., Baranovskaya N.V., Chekryzhov I.Yu., Ivanov V.V., Tsatska A.N. An unusual variety of geophagy: coal consumption by snow sheep in the Transbaikalia Mountains. *Doklady Earth Sciences*, 2024, vol. 516, pp. 1061–1066. DOI: 10.1134/S1028334X24601639.
13. Duvall E.S., Griffiths B.M., Clauss M., Abraham A.J. Allometry of sodium requirements and mineral lick use among herbivorous mammals. *Oikos*, 2023, vol. 9, pp. 10058. DOI: 10.1111/oik.10058.
14. Klaus G., Schmid B. Geophagy at natural licks and mammal ecology: a review. *Mammalia*, 1998, vol. 62, no. 4, pp. 482–498.
15. Panichev A.M. *Geophagy in the animal and human world*. Moscow, Nauka Publ., 1990. 223 p. (In Russ.)
16. Borruso L., Checcucci A., Torti V., Correa F., Sandri C., Luise D., Cavani L., Modesto M., Spiezio C., Mimmo T., Cesco S., Di Vito M., Bugli F., Randrianarison R.M., Gamba M., Rarojason N.J., Zaborra C.A., Mattarelli P., Trevisi P., Giacomini C. I like the way you eat it: lemur (*Indri indri*) gut microbiome and geophagy. *Microbial Ecology*, 2021, vol. 82, pp. 215–223. DOI: 10.1007/s00248-020-01677-5.
17. Banerjee S., Van der Heijden M.G.A. Soil microbiomes and one health. *Nature Reviews Microbiology*, 2023, vol. 21, pp. 6–20. DOI: 10.1038/s41579-022-00779-w.
18. Sherbakov O.I., Yuganova L.A. *State geological map of the Russian Federation, scale 1:200000. Anabaro-Vilyuiskaya series. Sheet P-52-XXVII*. St. Petersburg, VSEGEI Mapping Factory Publ. House, 1999. (In Russ.)
19. Mozalevsky E.L. *State geological map of the Russian Federation, scale 1:200000. Yudomskaya series. Sheet P-54-VIII*. St. Petersburg, VSEGEI Mapping Factory Publ. House, 1996. (In Russ.)
20. Babich A.P., Krukovskaya L.A. *State geological map of the Russian Federation, scale 1:200000 (second generation). Yudomskaya series. Sheet P-54-VIII*. St. Petersburg, VSEGEI Mapping Factory Publ. House, 2016. (In Russ.)
21. Stepanova V.V., Tirskey D.I., Argunov A.V., Okhlopov I.M. Visiting of salt licks by moose (*Alces alces* L., 1758, Cervidae, Artiodactyla) in South Yakutia. *Agrarny Vestnik Urala*, 2018, vol. 174, no. 7, pp. 52–57. (In Russ.)
22. Gaillardet J., Viers J., Dupre B. Trace elements in rivers waters. *Treasure on Geochemistry*. Amsterdam, Elsevier Pergamon, 2004. Vol. 5, pp. 225–272. DOI: 10.1016/B0-08-043751-6/05165-3.

23. Galanin A.A. Late Quaternary cryo-deserts of Central Yakutia. *Fundamental problems of the Quaternary: results of the study and the main directions of further research. Proc. of the X All-Russian Meeting on the Study of the Quaternary Period*. Moscow, GEOS Publ., 2017. pp. 83–85. (In Russ.)
24. Bowen H.J.M. *Environmental chemistry of elements*. London, New-York, Toronto, Sydney, San-Francisco, Academic Press, 1979. 250 p.
25. Egorov A.D., Grnigorieva D.V., Kurilyuk T.T., Sazonov N.N. *Microelements in soils and grassland plants of permafrost landscapes of Yakutia*. Yakutsk, Yakutian Publ. house, 1970. 287 p. (In Russ.)
26. Desyatkin R.V. “Animal” salt-lick of South-Western Yakutia. *Science and education*, 2014, vol. 2, pp. 10–14. (In Russ.)
27. Menkin V.K. *Animal feeding*. Moscow, Coloss Publ., 2006. 360 p. (In Russ.)
28. Ecke P., Hodgson D. R., Rose R.J. Induced diarrhea in horses. P. 1: Fluid and electrolyte balance. *Veterinary Journal*, 1998, vol. 155, pp. 149–159.
29. Ermakov V.V., Tutikov S.F. *Geochemical ecology of animals*. Moscow, Nauka Publ., 2008. 315 p. (In Russ.)
30. Katalymov M.V. *Micronutrients and microfertilizers*. Moscow, Khimiya Publ., 1965. 332 p. (In Russ.)
31. Kondrakhin I.P. *Alimentary and endocrine diseases of animals*. Moscow, Agroprom Publ., 1989. 256 p. (In Russ.)
32. Bazhenov S.V. *Veterinary toxicology*. St.-Petersburg, Kolos Publ., 1970. 310 p. (In Russ.)
33. Krasnoshchekova T.A., Perepelkina L.I., Nimaeva V.C. Dependence of selenium content in soil and fodder on the level of mercury, lead and cadmium, which are its antagonists. *Bulletin of the Ulyanovsk State Agricultural Academy*, 2017, vol. 4, pp. 145–148. (In Russ.) DOI: 10.18286/1816-45-2017-4-145-148.
34. 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. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 2016, vol. 40, pp. 0150413. DOI: 10.1590/18069657rbcs20150413.
35. Dubinin A.V. *Geochemistry of rare earth elements in the ocean*. Moscow, Nauka Publ., 2006. 360 p. (In Russ.)
36. Jiesheng L., Zhiguo S., Weidong Y., Jun C., Limin X., Hengyi L. Effect of Long-term Intake of Rare Earht in Drinking Water on Trace Elements in Brains of Mice. *Journal of Rare Earths*, 2002, vol. 20, no. 5, pp. 562–564.
37. Hutchison A.J., Albaaj F. Lanthanum carbonate for the treatment of hyperphosphataemia in renal failure and dialysis patients. *Expert Opinion on Pharmacotherapy*, 2005, vol. 6, no. 2, pp. 319–328.
38. He R., Xia Z. Effect of rare earth compounds added to diet on performance of growing-finishing pigs. *Second International Symposium on Trace Elements and Food Chain*, Wuhan, China, 1998. pp. 12–15.
39. Feng L., H. Xiao, He X., Li Z., Li F., Liu N., Zhao Y., Huang Y., Zhang Z., Chai Z. Neurotoxicological consequence of long-term exposure to lanthanum. *Toxicology Letters*, 2006, vol. 165, pp. 112–120.
40. Wang K., Cheng Y., Yang X., Li R. Cell response to lanthanides and potential pharmacological actions of lanthanides in metal ions in biological systems. *Metal Ions in Biological Systems*, 2003, vol. 40, pp. 707–751.
41. Mouri H., Malepe R.E., Candeias C. Geochemical composition and potential health risks of geophagic materials: an example from a rural area in the Limpopo Province of South Africa. *Environmental Geochemistry and Health*, 2023, vol. 45, pp. 6305–6322. DOI: 10.1007/s10653-023-01551-6.
42. Gomes C.S.F., Rautureau M., Gomes J.H.C., Silva E.A.F. Interactions of clay and clay minerals with the human health. *Minerals latu sensu and Human Health*, 2021, pp. 271–375. DOI: 10.1007/978-3-030-65706-2_7.
43. Gevera P.K., Mouri H. Geochemical and mineralogical composition of geophagic materials from Baringo town, Kenyan Rift Valley and their possible health effects on the consumers. *Environmental Geochemistry and Health*, 2021, vol. 43, pp. 4831–4846. DOI: 10.1007/s10653-021-00960-9.

Information about authors

Alexander M. Panichev, Dr. Sc., Cand. Sc., Leading Researcher, Pacific Institute of Geography FEB RAS, 7, Radio street, Vladivostok, 690041, Russian Federation. sikhote@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5223-443X>

Natalya V. Baranovskaya, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. nata@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3729-800X>

Ivan V. Seryodkin, Cand. Sc., Leading Researcher, Pacific Geographical Institute FEB RAS, 7, Radio street, Vladivostok, 690041, Russian Federation. seryodkinivan@inbox.ru; <http://orcid.org/0000-0003-4054-9236>

Innokenty M. Okhlopov, Cand. Sc., Director, Institute of Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, 41, Lenin avenue, Yakutsk, 677890, Russian Federation. imokhlopov@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6227-5216>

Nikolay V. Mamaev, Junior Researcher, Institute of Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, 41, Lenin avenue, Yakutsk, 677890, Russian Federation. mamaev_88@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5168-4113>

Igor Yu. Chekryzhov, Researcher, Far East Geological Institute FEB RAS, 159, 100 let Vladivostoku avenue, Vladivostok, 690022, Russian Federation. chekr2004@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0319-8759>

Lina V. Zhornyak, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. zlv@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4170-1976>

Elena A. Vakh, Cand. Sc., Senior Researcher, Far East Geological Institute FEB RAS, 159, 100 let Vladivostoku avenue, Vladivostok, 690022, Russian Federation. adasea@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6690-6505>

Vladimir V. Ivanov, Cand Sc., Head of the Laboratory of Micro- and Nanoscale Researches, Far East Geological Institute FEB RAS, 159, 100 let Vladivostoku avenue, Vladivostok, 690022, Russian Federation. d159327@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7917-9757>

Tatyana N. Lutsenko, Cand. Sc., Researcher, Pacific Institute of Geography FEB RAS, 7, Radio street, Vladivostok, 690041, Russian Federation. lutsenko53@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5433-8248>

Raisa A. Makarevich, Researcher, Pacific Geographical Institute FEB RAS, 7, Radio street, Vladivostok, 690041, Russian Federation. mak@tigdvo.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6787-6870>

Evgeny V. Elovsky, Researcher, Far Eastern Geological Institute of Far Eastern Branch of RAS, 159, 100 let Vladivostoku avenue, Vladivostok, 690022, Russian Federation. matri@list.ru

Dmitry S. Ostapenko, Researcher, Far Eastern Geological Institute FEB RAS, 159, 100 let Vladivostoku avenue, Vladivostok, 690022, Russian Federation. ihsunday888@gmail.com

Alexey A. Potoskuev, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. alex_pot@list.ru

Dmitry A. Strepetov, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. das57@tpu.ru; <http://orcid.org/0000-0002-1041-4747>

Received: 21.10.2024

Revised: 15.04.2025

Accepted: 21.05.2025