

УДК 551.79: 550.42

ПАЛЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЭМАЛИ ЗУБОВ ИСКОПАЕМЫХ МЕЛКИХ МЛЕКОПИТАЮЩИХ (УСТЬ-ОДИНСКИЙ РАЗРЕЗ, ПРЕДБАЙКАЛЬЕ)

© В.В.Иванова¹, А.А. Щетников², Е.Ю. Семеней³, И.А. Филинов²

¹Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана им. академика И.С. Грамберга, 190121, Россия, г. Санкт-Петербург, Английский проспект, 1.

^{2,4}Институт земной коры СО РАН, 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128.

³Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3.

В настоящей работе представлены результаты изучения спектров редкоземельных элементов (РЗЭ) в эмали зубов мелких млекопитающих, собранных из разных горизонтов Усть-Одинского разреза (Предбайкалье). Усть-Одинский разрез является единственным известным в регионе и доступным для непосредственного изучения разрезом, где фиксируется стратиграфическая последовательность отложений всех изотопных стадий верхнего неоплейстоцена от МИС 5 до МИС 1.

Основная задача, которая стояла при выполнении данного исследования, – решение проблемы синхронности формирования дисгармоничных фаун мелких млекопитающих, то есть диагностика переотложенного костного материала. Для этого было проведено изучение состава спектров РЗЭ ископаемых костных остатков и вмещающих отложений. Различия в трендах фракционирования РЗЭ позволяют провести диагностику переотложенного костного материала. Результаты изучения спектров РЗЭ в эмали зубов мелких млекопитающих, собранных из разных горизонтов Усть-Одинского разреза, показали, что различный уровень накопления РЗЭ в образцах костных остатков в пределах каждого из горизонтов дает возможность сделать вывод об изменениях физико-химических условий среды диагенеза и о возможности применения геохимических коэффициентов, отражающих фракционирование РЗЭ, для классификации выборки. Метод дискриминантного анализа позволяет выделить группу параметров, дающую оптимальное разделение (степень корректности – 85%) между предполагаемыми группировками, характеризующими различные стратиграфические уровни разреза. Значимыми (вносящими максимальный вклад в достоверность разделения образцов) являются цериевая аномалия (Se^*), тетрадный эффект для первой тетрады (T_1), отношение $LPZЭ / TPZЭ$ ($p < 0,05$). Показано, что в рассматриваемой выборке присутствуют переотложенные костные остатки.

Ключевые слова: редкоземельные элементы; ископаемые мелкие млекопитающие; палеоэкологическая интерпретация; поздний плейстоцен; Предбайкалье.

PALEOENVIRONMENTAL INTERPRETATION OF RARE EARTH ELEMENT FRACTIONATION IN TOOTH ENAMEL OF SMALL MAMMALS FOSSILS (UST-ODYNSKY CROSS-SECTION, CISBAIKALIA)

V.V. Ivanova, A.A. Shchetnikov, E.I. Semenei, I.A. Filinov

All-Russia Research Institute of Geology and Mineral Resources of the World Ocean named after Academician I.S. Gramberg, 1 Angliiskii pr., St. Petersburg, 190121, Russia.

Institute of the Earth Crust SB RAS, 128 Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russia.

V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 3 Akademik Koptyug pr., Novosibirsk, 630090, Russia.

¹Иванова Варвара Викторовна, ведущий научный сотрудник, e-mail: v_ivanova@rambler.ru
Ivanova Varvaga, Leading Researcher, e-mail: v_ivanova@rambler.ru

²Щетников Александр Александрович, старший научный сотрудник, e-mail: shch@crust.irk.ru
Shchetnikov Aleksandr, Senior Researcher, e-mail: shch@crust.irk.ru

³Семеней Елена Юрьевна, младший научный сотрудник, e-mail: semselana@gmail.com
Semenei Elena, Junior Researcher, e-mail: semselana@gmail.com

⁴Филинов Иван Анатольевич, научный сотрудник, e-mail: filinov@crust.irk.ru
Filinov Ivan, Researcher, e-mail: filinov@crust.irk.ru

This work presents the results of studying the spectra of rare earth elements in the tooth enamel of small fossil mammals collected from different horizons of Ust-Odinsky cross-section (Cisbaikalie). Ust-Odinsky cross-section is currently the only known section in the region where the stratigraphic sequence of deposits of all Late Pleistocene isotopic stages (from MIS 5 to MIS 1) is traced.

The main task of this work was to find the solution of the problem of synchronous formation of small mammal disharmonious faunas, i.e the diagnosis of redeposited bone material. For this purpose the spectra composition of rare earth elements (REE) was analyzed in fossil bone fragments and host sediments. Differences in REE fractionation trends allow to carry out the diagnosis of redeposited bone material. The results of studying the REE spectra in the tooth enamel of small mammals collected from the different horizons of Ust-Odinsky cross-section showed that different levels of REE accumulation in the samples of bone remains within each of the horizons makes it possible to make a conclusion on the changes in physical and chemical conditions of diagenesis environment and application possibility of geochemical factors reflecting the REE fractionation in order to classify the sampling. The method of discriminant analysis allows to distinguish a group of parameters enabling optimum separation (85% correctness) between the probable groups that characterize the different stratigraphic levels of the cross-section. Maximum contribution to the reliability of samples separation (the significant ones) are the cerium anomaly (Ce^*), the tetradic effect for the first tetrad (T_1), and the ratio of LREE / HREE ($p < 0,05$). It is shown that the sample under investigation contains redeposited bone remain.

Keywords: rare earth elements; fossil small mammals; paleo-environmental interpretation; Late Pleistocene; Cisbaikalie.

В четвертичной палеонтологии хорошо известен феномен совместного обитания в холодные эпохи плейстоцена видов растений и животных, ареалы которых в настоящее время значительно удалены друг от друга. Эти парадоксальные сообщества с весьма разными требованиями к условиям существования принято называть «тундростепными», «смешанными» или «дисгармоничными» [7, 11, 12].

Для территории Байкальского региона типичными представителями дисгармоничных фаун являются копытные лемминги – исключительно тундровые животные, ареал которых не выходит за пределы распространения многолетней мерзлоты. Для сартанских (МИС 2) и муруктинских (МИС 4) отложений обширной территории юга Сибирской платформы (Предбайкалье) такие таксоны копытных леммингов, как *Dicrostonyx* cf. *henseli* u *D.* cf. *guilielmi* признаны руководящими формами [9]. Часто в совместном залегании с ними присутствуют остатки степной пищухи, степной пеструшки, длиннохвостого суслика, хомячка – представителей степных и полупустынных сообществ [9, 15].

Мелкие млекопитающие, как правило, не способны к миграциям на большие расстояния, при этом они обладают высокими темпами видообразования и расселения и достаточно быстрой

реакцией на изменения окружающей среды. Все это позволяет эффективно использовать ископаемую микротериофауну в палеоэкологических реконструкциях. Важным моментом в таких работах является достоверность стратиграфической привязки палеонтологических находок, особенно в случае обнаружения дисгармоничных (смешанных) фаун, с проверкой возможности загрязнения костеносного слоя разновозрастным остеологическим материалом.

Во многих случаях невозможно идентифицировать переотложенный костный материал. Методы его идентификации важны для представления количественного распределения фауны в определенных стратиграфических горизонтах, разрешения проблем установления возраста ископаемой фауны и разрешения случаев, когда ископаемые остатки обнаруживаются в заведомо стратиграфически молодых горизонтах.

Изучение спектров распределения редкоземельных элементов (РЗЭ) в ископаемых костных остатках для диагностики переотложенного костного материала впервые предложено С.Н. Трумэнном с соавторами [20]. Важным методическим достижением можно считать доказательство того, что: 1) РЗЭ и другие микроэлементы поступают в костный материал в течение короткого промежутка времени после захоронения

[14] при ранних диагенетических изменениях костного апатита; 2) после этого спектр РЗЭ в костном материале остается постоянным, сохраняясь как запись условий седиментогенеза и диагенеза [16]. Спектры РЗЭ в костных остатках из различных стратиграфических горизонтов различаются, являясь уникальными показателями условий их образования.

Существующие методики диагностики переотложенного костного материала основаны на применении различных индикаторных коэффициентов (отношений содержаний отдельных элементов группы РЗЭ) и классификационных диаграмм, отражающих степень фракционирования (изменение соотношения легких (La-Nd), средних (Sm-Gd), тяжелых (Tb-Lu) РЗЭ) в процессе диагенеза костного апатита.

Методика стратиграфической привязки костей с учетом специфики полярного литогенеза апробирована нами на многих разрезах четвертичных

отложений Арктической Сибири [2, 3]. В качестве одного из критериев, отражающих принадлежность фаунистических остатков к конкретному стратиграфическому горизонту, предлагается использовать величину тетрадного эффекта фракционирования лантаноидов, которая является индикатором фациальных и климатических условий осадконакопления и специфична для костных остатков и отложений, принадлежащих к различным стратиграфическим уровням.

Общие сведения о разрезе. Усть-Одинский разрез расположен на юге Иркутско-Черемховской равнины Иркутского амфитеатра Сибирской платформы, на правом берегу реки Китой в районе впадения в нее реки Ода (рис. 1). В настоящее время этот разрез является одним из ключевых и позиционируется в качестве наиболее полного из доступных для непосредственного изучения осадочных архивов верхнего плейстоцена обширной территории Предбайкалья [9, 13].

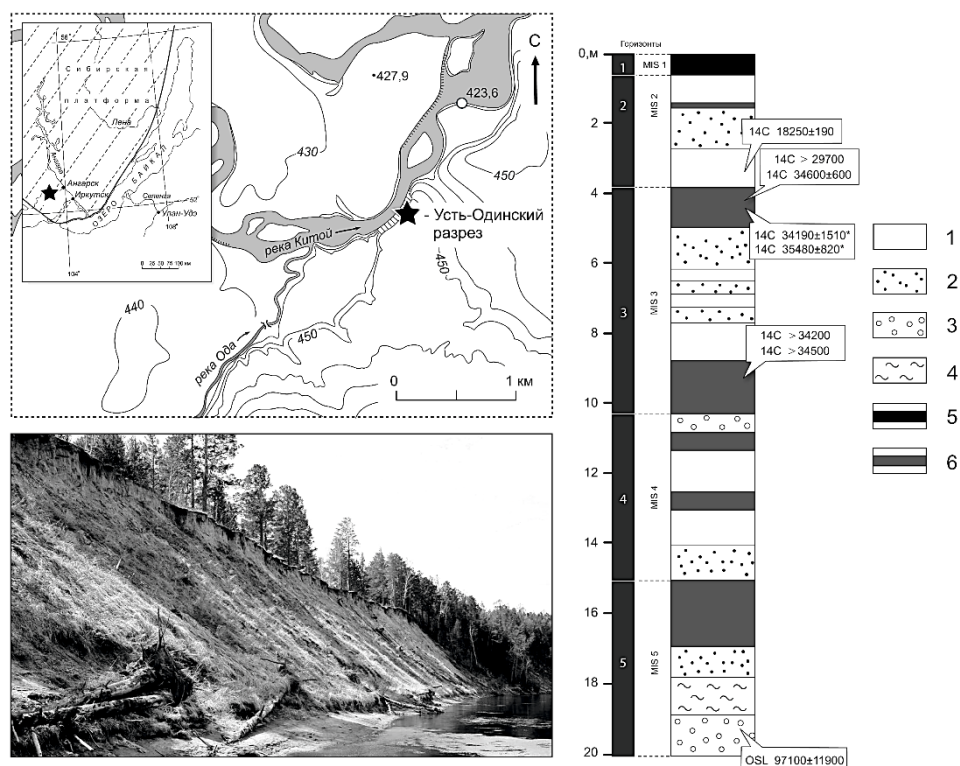


Рис. 1. Местоположение Усть-Одинского разреза и его литолого-стратиграфическое строение (по [13]):

1 – лессовидные суглинки; 2 – суглинки опесчаненные и супеси; 3 – аллювиальные пески; 4 – субаквальные суглинки; 5 – современные почвы; 6 – погребенные почвы

Разрез был открыт и впервые исследован в 1970-х годах Н.К. Молотковым [6]. Позже в нем были выделены и палеонтологически обоснованы все ступени верхнеплейстоцен-голоценового времени [5, 9], соответствующие морским изотопным стадиям МИС 5 – МИС 1. В последние годы хроностратиграфия разреза была подтверждена геохронометрическими данными, отложения выделенных горизонтов были датированы ^{14}C [4, 5] и $^{230}\text{Th}/\text{U}$ методами. Проведено детальное стратиграфическое расчленение разреза [13], выполнено лито- и геохимическое исследование слагающих его осадков, позволившее реконструировать условия и особенности седиментогенеза [8].

В Усть-Одинском опорном разрезе верхнего неоплейстоцена на размытой поверхности юрских песчаников залегает толща эолово-делювиальных и аллювиальных отложений с заключенными в них погребенными почвами. Традиционно [9] в структуре четвертичной части разреза выделяется сверху вниз пять стратиграфических горизонтов (см. рис. 1).

Unit 1 (голоценовый, МИС 1). Горизонт представлен коричневыми супесями и суглинками современных подзолистых почв. Нижний контакт неровный, градиентный. Мощность – 0,6 м.

Unit 2 (сарганский, МИС 2). Светло-бежевые супеси с тонкой пологоволнистой слойчатостью и линзами разнородных пылеватых песков, окатанные. Широкое распространение имеют псевдоморфозы по ледяным клиньям и жилам. Нижний контакт четкий, неровный. В интервале глубин 140–155 см согласно петромагнитным данным [13] фиксируется редуцированный размывом маломощный слой ископаемой почвы. С глубины 3,65 м нами была получена ^{14}C дата 18250 ± 190 л.н. (СОАН-8848). Мощность горизонта составляет 2,5–3,5 м.

Unit 3 (каргинский, МИС 3). Коричневато-серые супеси и оглеенные су-

глинки, переслаивающиеся с темно-коричневыми сильно криотурбированными палеопочвами. Горизонт имеет невыдержанную по простиранию мощность, почвы часто расщепляются, выклиниваются. Нижний контакт четкий, волнистый. Из верхнего почвенного слоя, залегающего на глубине около 4 м, были получены (по гумусу) радиоуглеродные даты 34190 ± 1510 (ЛУ-6517А) и 35480 ± 820 (ЛУ-6516А) л.н. [4], а также по костям крупных млекопитающих даты 34600 ± 600 л.н. (AMS, ОхА-25677) и > 29700 л.н. (ЛУ 6676). Из почвы, залегающей на глубине 9–10 м, нами были получены ^{14}C даты > 34200 (ЛУ-7119) и > 34500 (ЛУ-7121). Общая мощность горизонта составляет 3–6 м.

Unit 4 (муруктинский, МИС 4). Отложения горизонта представлены пологоволнистыми песками и супесями коричневого цвета с прослоями и линзами суглинков. Пески разнородные, от мелко- до крупнозернистых, с прослоями гравия и гальки. На глубинах 10,8–11,5 м и 12,6–13,3 м согласно петромагнитным данным [13] фиксируются рудименты палеопочв. Нижний контакт четкий, пологоволнистый. Общая мощность горизонта составляет 6–7 м.

Unit 5 (казанцевский, МИС 5). Этот горизонт объединяет отложения пестрого литологического состава и генезиса. В его кровле залегает темно-серый обогащенный разнообразными органическими включениями слой глин и суглинков старичных фаций аллювия с развитыми по ним гидроморфным оторфованным палеопочвами сложного строения и линзами гиттии. Ниже следует 2–3 метровый слой охристого валунно-галечного аллювия с прослоями хорошо сортированных косослойчатых русловых песков. Общая мощность горизонта составляет 4–8 м.

Из всех горизонтов была собрана коллекция (16 образцов) зубов мелких млекопитающих (рис. 2) и отобраны вмещающие отложения.

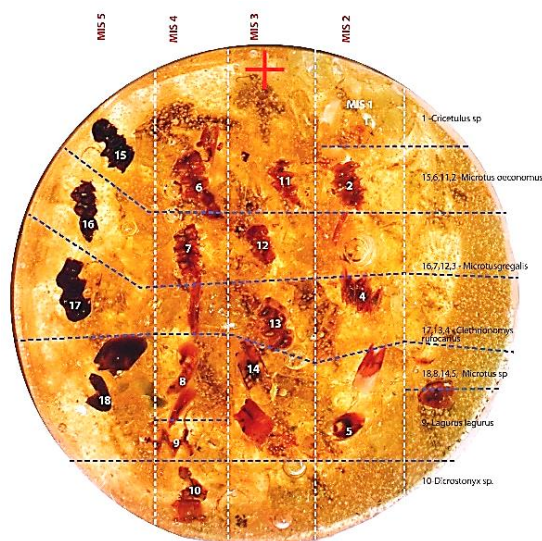


Рис. 2. Коллекция образцов зубов

Главной задачей наших работ был анализ степени синхронности дисгармоничной микротериофауны, собранной в опорном разрезе верхнего плейстоцена Усть-Одинский. В настоящей статье представлены результаты изучения спектров РЗЭ в эмали зубов мелких млекопитающих, собранных из разных горизонтов этого разреза.

Методы исследования. Для характеристики вещественного состава отложений Усть-Одинского разреза проведены петрохимические (106 образцов) и геохимические (10 образцов) исследования слагающих разрез терригенных пород. Определение содержаний главных элементов в породах выполнено рентгенофлуоресцентным методом (ИЗК СО РАН, г. Иркутск), а элементов-примесей (РЗЭ, Li, Be, Sc, Cu, Zn, Ga, Y, Nb, Cs, Hf, Ta, Th, U) – методом ICP-MS (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск) с относительной погрешностью 5–10%. Данные о содержании РЗЭ в эмали зубов мелких млекопитающих получены методом LA-ICP-MS (метод масс-спектрометрии с лазерной абляцией проб).

Результаты. Основные критерии, по которым оценивались спектры РЗЭ четвертичных отложений и костных остатков Усть-Одинского разреза, заимствованы из работ [10], в частности:

- величины цериевой и европиевой аномалии, выраженные как $Ce^* = 3Ce_n / (2La_n + Nd_n)$; и $Eu^* = 2Eu_n / (Sm_n + Gd_n)$;
- $PЗЭ + Y$;
- $\Sigma Ce / \Sigma Y$, где ΣCe (La - Gd), ΣY (Tb - Lu, Y), что отражает интенсивность процессов выветривания;
- La / Yb , La / Sm – индикаторы фациальных условий;
- T_1 , T_3 , T – величины тетрадного эффекта [18] лантаноидов для 1 и 3 тетрад и суммарного T – показатели физико-химических условий фоссилизации [2].

В табл. 1 приведены результаты изучения распределения РЗЭ в четвертичных отложениях с помощью перечисленных показателей.

В породах Усть-Одинского разреза величины суммы РЗЭ в их различных литофациальных разностях существенно различны, что связано с высокими скоростями осадконакопления [1].

При описании стратиграфических горизонтов Усть-Одинского разреза (см. рис. 1) был отмечен существенно песчаный характер отложений. Объяснить повышенные содержания РЗЭ в отложениях разреза присутствием там глинистых пород было бы некорректным. Какую-то роль могли сыграть процессы фракционирования осадочного материала на этапах метаморфизма пород образования Иркутского амфитеатра.

Величина европиевой аномалии изменяется от 1,14 до 2,07, что подтверждает присутствие в осадках вулканогенного материала, обогащенного европием за счет темноцветных минералов и плагиоклаза. Среднее значение $Ce / Ce^* = 0,93$ соответствует значению в отложениях континентальных обстановок осадконакопления. Величина показателя $\Sigma Ce / \Sigma Y$ (среднее – 4,06) могло бы свидетельствовать в пользу гумидного типа литогенеза [1], но в силу незначительного развития процессов химического выветривания во время формирования отложений разреза отражает, скорее, особенности исходных пород.

Таблица 1

Геохимические особенности распределения РЗЭ в четвертичных отложениях Усть-Одинского разреза (по данным авторов)

Номер пробы	Ce*	Eu*	$\frac{LPZ\bar{E}}{TPZ\bar{E}}$	РЗЭ+Y	$\Sigma Ce / \Sigma Y$	La/Yb	La/Sm	T ₁	T ₃	T
P3-003	0,97	1,14	1,28	204,76	3,85	1,30	1,16	0,50	0,56	0,53
P3-007	0,95	1,21	1,39	218,97	4,01	1,41	1,23	0,48	0,55	0,52
P3-040	0,94	1,17	1,29	192,18	3,62	1,23	1,09	0,53	0,55	0,53
P3-045	0,92	1,51	1,56	101,30	4,10	1,62	1,36	0,65	0,71	0,69
P3-061	0,95	1,18	1,32	190,42	3,72	1,28	1,13	0,52	0,53	0,53
P3-073	0,94	1,25	1,44	161,83	3,93	1,41	1,22	0,56	0,59	0,59
P3-081	0,92	1,43	1,63	118,40	4,62	1,70	1,38	0,62	0,69	0,67
P3-105	0,89	2,07	1,78	81,40	5,10	1,84	1,50	0,70	0,77	0,73
P3-04-II	0,90	1,23	1,36	198,07	3,67	1,34	1,16	0,53	0,55	0,54
P3-01-II	0,93	1,21	1,53	178,12	4,02	1,60	1,17	0,54	0,59	0,58

Примечание. Ce* и Eu* – величины цериевой и европиевой аномалии, выраженные как

$$Ce^* = 3Ce_n / (2La_n + Nd_n); \text{ и } Eu^* = 2Eu_n / (Sm_n + Gd_n);$$

$$\Sigma Ce / \Sigma Y, \text{ где } \Sigma Ce \text{ (La - Gd), } \Sigma Y \text{ (Tb - Lu, Y);}$$

T₁, T₃, T – величины тетрадного эффекта [18] лантаноидов для 1 и 3 тетрад и суммарного T.

Уменьшение отношения $\Sigma Ce / \Sigma Y$ обусловлено низкой подвижностью тяжелых лантаноидов. Незначительное изменение других геохимических параметров обусловлено слабым химическим и минеральным преобразованием материнских пород на ранних стадиях развития коры выветривания. Преобладание легких РЗЭ над тяжелыми обусловлено, видимо, присутствием в кислых породах

областей сноса пелитизированного полевого шпата.

Спектры распределения РЗЭ (рис. 3) для всех образцов четвертичных отложений однотипны. Отмечается избыток легких лантаноидов при дефиците тяжелых. Все эти особенности фракционирования РЗЭ установлены для континентальных отложений, слагающих данный разрез.

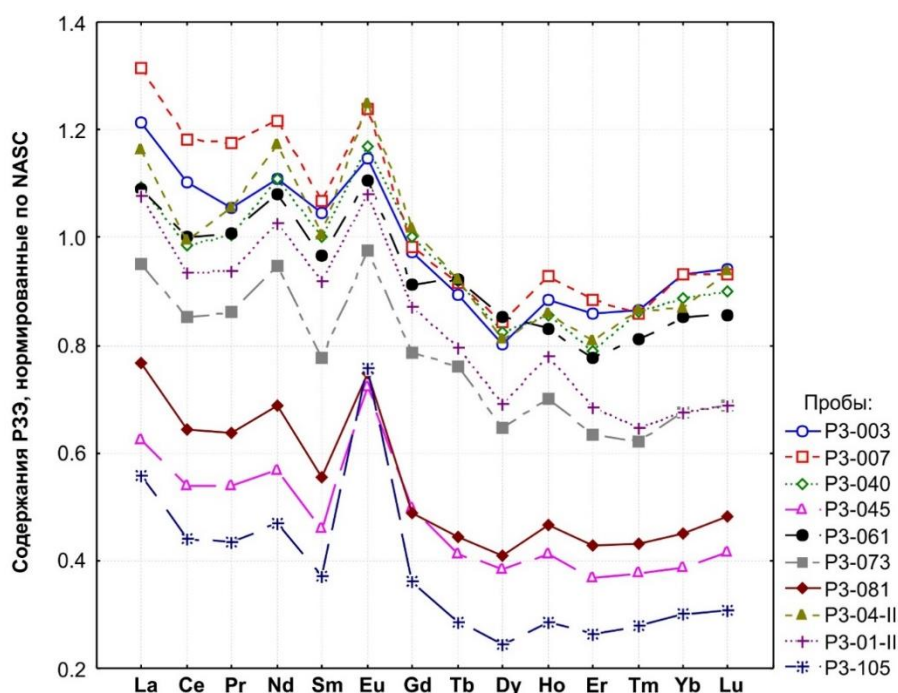


Рис. 3. Спектры распределения РЗЭ в отложениях Усть-Одинского разреза (нормированы по NASC [19])

Сопоставление графиков распределения нормированных содержаний РЗЭ в четвертичных отложениях позволяет сделать следующие выводы:

- изучаемые породы различаются по содержаниям РЗЭ: в средней и верхней частях разреза они в целом более высокие;

- полученное для пород разреза соотношение $La_N / Yb_N - La_N / Sm_N$ соответствует континентальным отложениям.

В табл. 2 приведены коэффициенты корреляции между Σ ЛРЗЭ, Σ Ср.РЗЭ, Σ ТРЗЭ, Σ Се / Σ Y и другими геохимическими показателями в выборках проб четвертичных отложений.

Анализ приведенных данных позволяет предположить, что в общем накоплении РЗЭ участвуют процессы изоморфного замещения ими катионов породообразующих минералов, а также сорбция оксигидроксидными соединениями фемических элементов. На фракционирование легких и средних РЗЭ оказывают влияние различия в их комплексобразующей способности в водной среде [17]. Рост их содержаний в осадках можно связать и с частичным хроматографированием растворов при прохождении сквозь осадочную толщу.

Во всех образцах отмечается заметный тетрадный эффект W-типа для 1, 3 тетрад, однако максимально он проявлен в палеопочвах (образцы РЗ-040, РЗ-061, РЗ-04-II), что подтверждает континентальный характер стока.

Лантаноидный тетрадный эффект фракционирования РЗЭ впервые был установлен экспериментально при изучении их экстракции в системах водных фаз, а также между органической и водной фазами [17]. Он проявляется в нарушении формы спектра нормированных по хондриту содержаний РЗЭ и выражен в разделении его на 4 группы (тетрады) с образованием зигзагообразной кривой: La-Ce-Pr-Nd, Pm-Sm-Eu-Gd, Gd-Tb-Dy-Ho и Er-Tm-Yb-Lu. Для каждой тетрады в спектре редких земель образуются небольшие изгибы, границы которых проходят между Nd и Sm по Gd и между Ho

и Er. Вогнутые изгибы соответствуют W-типу тетрад-эффекта, выпуклые – M-типу. В морской воде, грунтовых водах, а также в известняках и других осадочных породах обнаруживается W-тип тетрадного эффекта. Значимыми для W-типа тетрадного эффекта являются величины меньше 0,9, а для M-типа – больше 1,1.

Обычно поведение РЗЭ в большинстве геологических обстановок объяснялось различием их ионных радиусов (увеличением разделения на 5s и 5p электронных уровнях с увеличением атомных масс) и вариациями валентностей (Ce^{3+} или Ce^{4+} , Eu^{2+} или Eu^{3+}). В настоящее время установлено, что наряду с кристаллохимическими особенностями тетрадный эффект обусловлен существованием комплексных соединений редких земель в водной среде.

Содержания РЗЭ в ископаемых костных остатках и соответствующие расчетные геохимические коэффициенты приведены в табл. 3.

Сравнение данных табл. 1 и 3 показывает, что по уровню содержания РЗЭ кости значительно отличаются от пород, что является свидетельством их диагенетических преобразований.

Суммарная концентрация РЗЭ (преобладают Се и La) в образцах коррелирует с Y / Ho (0,52), Nd / Yb (0,55) и тетрадным эффектом (-0,8). Щелочные воды с высоким pH, как правило, обогащены тяжелыми РЗЭ, образующими комплексные соединения. Таким образом, костные остатки, фоссилизирующиеся в контакте со щелочными водами, будут обогащены HREE. С другой стороны, большинство минералов осадочных пород, гидроокислы железа и оксиды марганца, а также глина и органические вещества обогащены легкими и средними РЗЭ. Эти элементы переходят в подвижную форму при контакте минералов с водой, в процессе химического выветривания, ионного обмена или растворения в восстановительных условиях. Кости, фоссилизованные в таких условиях, будут обогащены LREE и MREE.

Таблица 2

**Коэффициенты корреляции между геохимическими индикаторами
и элементами в выборке проб четвертичных отложений изученного разреза**

Эле- мент	ЛРЗЭ	Ср.РЗЭ	ТРЗЭ	РЗЭ+Y	La/Yb	La/Sm	T ₁	T ₃
Sc	0,83	0,90	0,85	0,85	-0,80	-0,95	-0,82	-0,89
Zr	0,76	0,67	0,75	0,74	-0,65	-0,50	-0,77	-0,65
V	0,80	0,87	0,80	0,82	-0,72	-0,91	-0,79	-0,86
Cr	0,56	0,47	0,48	0,54	-0,16	-0,20	-0,52	-0,38
Co	0,74	0,80	0,72	0,76	-0,57	-0,78	-0,71	-0,75
Ni	0,23	0,14	0,16	0,20	0,14	0,15	-0,18	-0,03
Cu	0,74	0,73	0,70	0,74	-0,44	-0,55	-0,69	-0,63
Zn	0,79	0,84	0,78	0,81	-0,65	-0,80	-0,76	-0,80
Rb	-0,04	0,01	-0,03	-0,04	0,16	0,05	0,10	0,08
Sr	-0,30	-0,40	-0,33	-0,33	0,28	0,48	0,26	0,39
Ba	-0,39	-0,42	-0,38	-0,40	0,51	0,58	0,45	0,52

Таблица 3

**Геохимические особенности распределения РЗЭ
в ископаемых костных остатках Усть-Одинского разреза**

Номер образца*	1	2	4	5	6	8	9	10
Стадия МИС	1	2	2	2	4	4	4	4
La	31	44,5	37	49,2	145	345	84	340
Ce	30	52,25	39	58,6	105	269,5	66	520
Pr	7,1	9,125	7,35	9,9	21	59,5	19	54,5
Nd	37	40,75	30	35,6	89,5	239	64	230
Sm	7,7	9,925	5,8	7,22	16	41	8,2	43
Eu	2,3	2,3	1,3	1,618	3,65	9,2	2,7	10,25
Gd	9,6	9,475	6,55	8,84	18,5	45	13	45,5
Tb	1,2	1,395	0,845	0,93	2,4	5,75	2,3	6,3
Dy	10	10,3	4,35	5,74	14	30,9	14	38
Ho	1,5	1,75	0,95	1,114	3,45	5,95	3	7,6
Er	5,3	5,15	2,75	3,24	8,55	15,4	7,4	20,5
Tm	0,71	0,765	0,345	0,502	1,25	2,02	1,5	2,9
Yb	5,3	4,875	2,45	3	7,65	12,4	9,7	23,5
Lu	0,62	0,68	0,35	0,484	1,4	1,785	1,1	2,6
Y	71	70,25	37	48	125	231	110	280
Ce*	0,48	0,61	0,55	0,62	0,43	0,44	0,39	0,88
Eu*	1,25	1,11	0,99	0,95	0,99	1,00	1,19	1,09
REE+Y	220,33	263,49	176,04	233,99	562,35	1313,41	405,90	1624,65
Ece/Ey	1,30	1,77	2,59	2,71	2,44	3,30	1,72	3,26
La/Yb	0,58	0,91	1,51	1,64	1,90	2,78	0,87	1,45
La/Sm	0,72	0,81	1,15	1,22	1,63	1,51	1,84	1,42
Nd/Yb	0,79	0,95	1,39	1,35	1,33	2,19	0,75	1,11
T ₁	0,70	0,61	0,65	0,56	0,50	0,32	0,52	0,10
T ₃	0,37	0,33	0,57	0,54	0,29	0,12	0,21	0,21
T ₄	0,37	0,38	0,59	0,51	0,28	0,06	0,01	0,36
T	0,50	0,46	0,60	0,54	0,37	0,20	0,32	0,25
Y/Ho	49,23	41,75	40,51	44,81	37,68	40,38	38,13	38,32

Номер образца	11	12	13	14	15	16	17	18
Стадия МИС	3	3	3	3	5	5	5	5
La	6,3	350	69	405	130	160	62	130
Ce	6	300	52	205	190	260	66	220
Pr	0,98	52	12	68	25,5	31	9,3	25,5
Nd	5,8	220	51	280	109	130	39	101,5
Sm	1	39	9,5	43,5	23	23	8,3	20,5
Eu	0,29	7,7	2,1	8,75	5	5	1,8	4,95
Gd	1,8	28	11	36	21,5	22	11	20,5
Tb	0,17	3,6	1,2	4,5	2,75	2,5	0,99	2,8
Dy	1,2	19	6,7	23	17	15	6,4	16
Ho	0,26	3,2	1,3	4,45	3,2	2,9	1,3	2,8
Er	0,78	8	3,3	10,5	7,8	7,7	3,7	7,85
Tm	0,13	1	0,42	1,55	1,05	0,94	0,57	1,12
Yb	0,85	6,3	2,7	10,05	6,7	5,1	3,4	5,95
Lu	0,15	0,83	0,38	1,45	0,89	0,79	0,6	0,85
Y	12	110	43	165	99	110	64	125
Ce*	0,55	0,51	0,42	0,29	0,77	0,86	0,63	0,90
Eu*	0,97	1,08	0,96	1,04	1,06	1,04	0,88	1,13
REE+Y	38	1149	266	1267	642	776	278	685
Ece/Ey	1,43	6,56	3,50	4,74	3,64	4,35	2,44	3,22
La/Yb	0,74	5,56	2,56	4,03	1,94	3,14	1,82	2,18
La/Sm	1,13	1,61	1,31	1,67	1,02	1,25	1,34	1,14
Nd/Yb	0,77	3,96	2,14	3,16	1,85	2,89	1,30	1,94
T ₁	0,89	0,26	0,62	0,45	0,28	0,16	0,59	0,20
T ₃	0,81	0,08	0,49	0,06	0,17	0,25	0,54	0,15
T ₄	0,75	0,31	0,55	0,13	0,28	0,39	0,50	0,30
T	0,82	0,24	0,55	0,27	0,25	0,28	0,54	0,23
Y/Ho	48,00	35,75	34,40	38,56	32,18	39,45	51,20	46,43

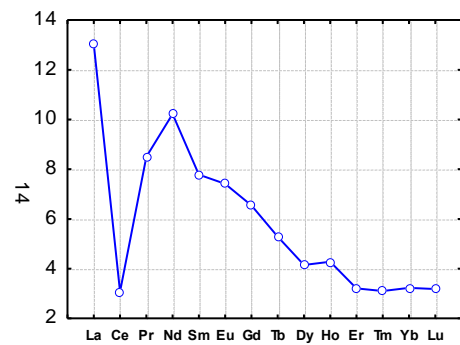
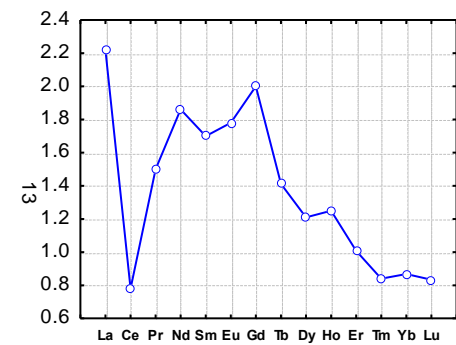
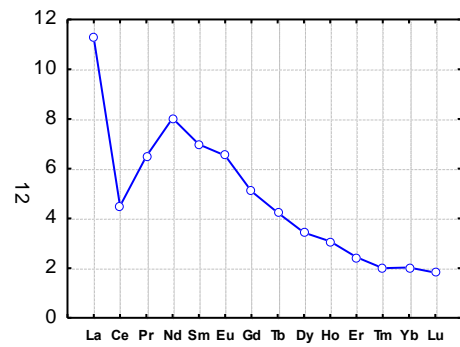
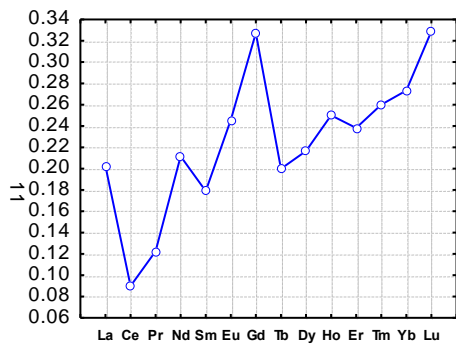
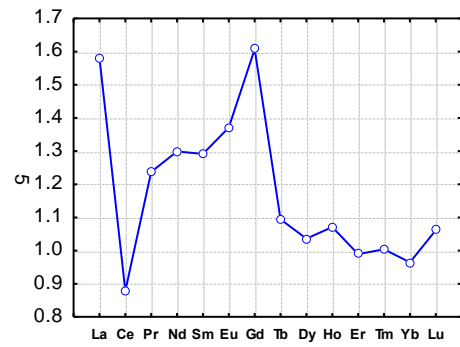
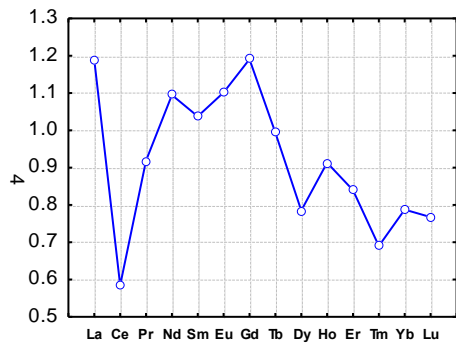
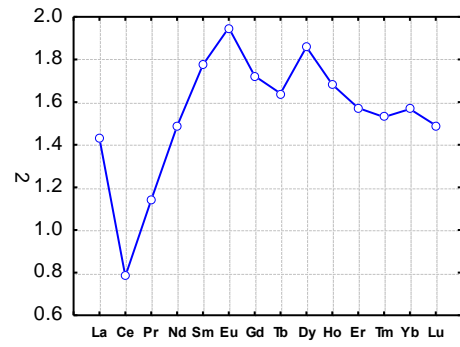
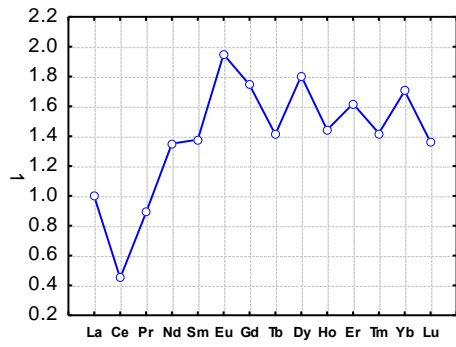
Примечание. * 4, 13, 17 – *Clethrionomys rufocanus*; 1 – *Cricetulus sp.*; 10 – *Dicrostonyx sp.*; 9 – *Lagurus lagurus*; 12, 16 – *Microtus gregalis*; 2, 6, 11, 15 – *Microtus oeconomus*; 5, 8, 14, 18 – *Microtus sp.*

Распределение Nd / Yb, La / Yb и других геохимических коэффициентов РЗЭ по стратиграфическим уровням могут отражать периодические краткосрочные колебания климата и палеоэкологические изменения.

В спектрах зубов (рис. 4) выделяются образцы, обогащенные средними и тяжелыми РЗЭ. Большая часть проб имеет спектры кардинально (за исключением сильной отрицательной цериевой аномалии) похожие на спектры вмещающих пород. Пробы визуально разделяются на совокупности МИС 1 – МИС 5. По форме спектра от стадии МИС 1 до МИС 5 наблюдается усиление деплетирования тяжелых РЗЭ.

Образцы 9, 11, 17 отличаются по форме спектра от остальных образцов из соответствующих совокупностей. Видно различие в уровнях накопления РЗЭ в пределах совокупностей, отражающее, видимо, принадлежность образцов к различным стратиграфическим уровням.

График, отражающий фракционирование легких, средних и тяжелых РЗЭ, позволяет выделить группу образцов костей, fossilized в обстановке, не затронутой педогенными процессами (рис. 5). Это образцы 8, 12, 13, 14, 15, 16, 18. По положению группы имеющихся образцов четвертичных отложений в общем можно сделать вывод о принадлежности костных остатков к изучаемому разрезу.



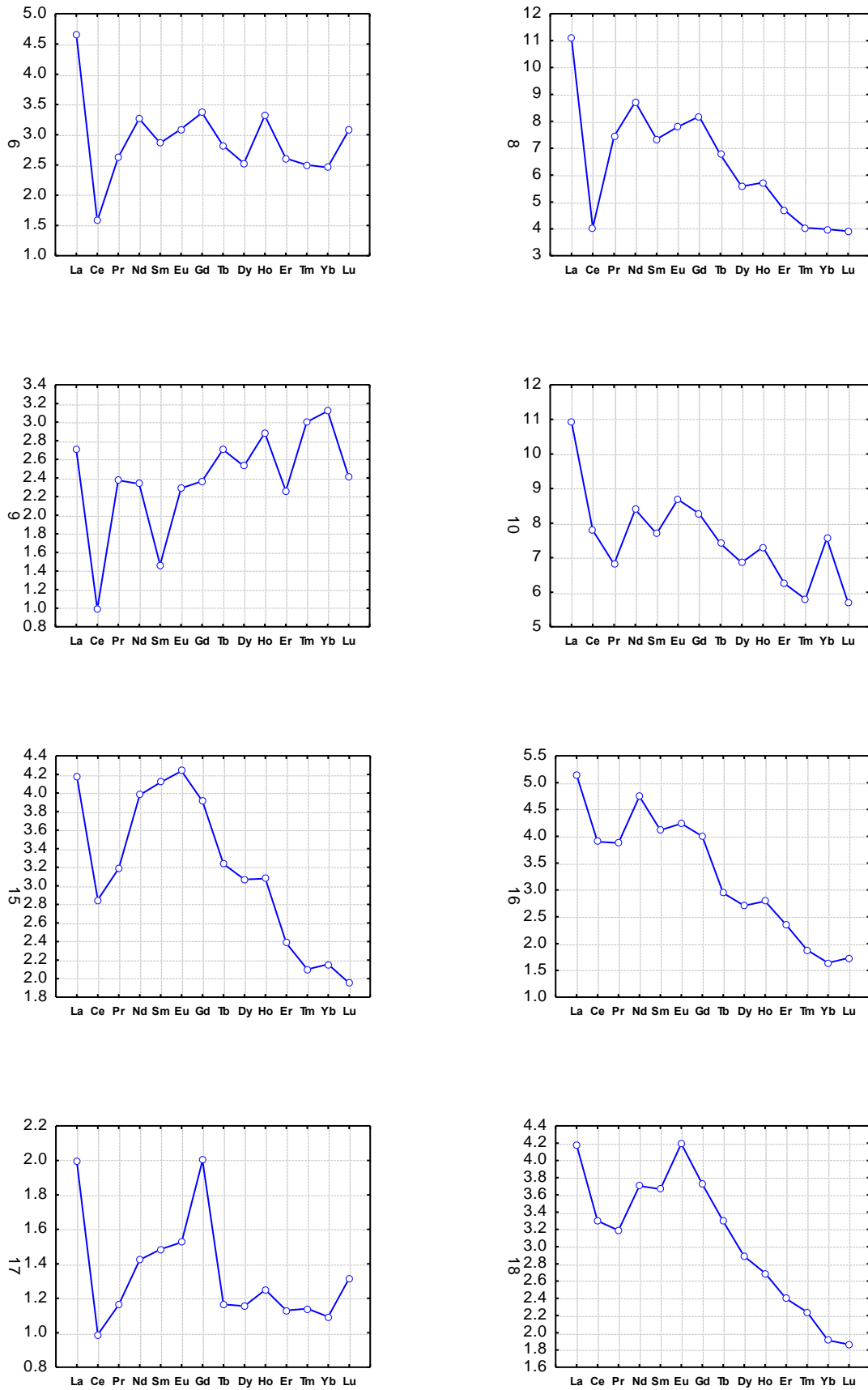


Рис. 4. Спектры распределения РЗЭ в ископаемых костных остатках Усть-Одинского разреза (нормированы по NASC). Показатели 1–18 – номера образцов

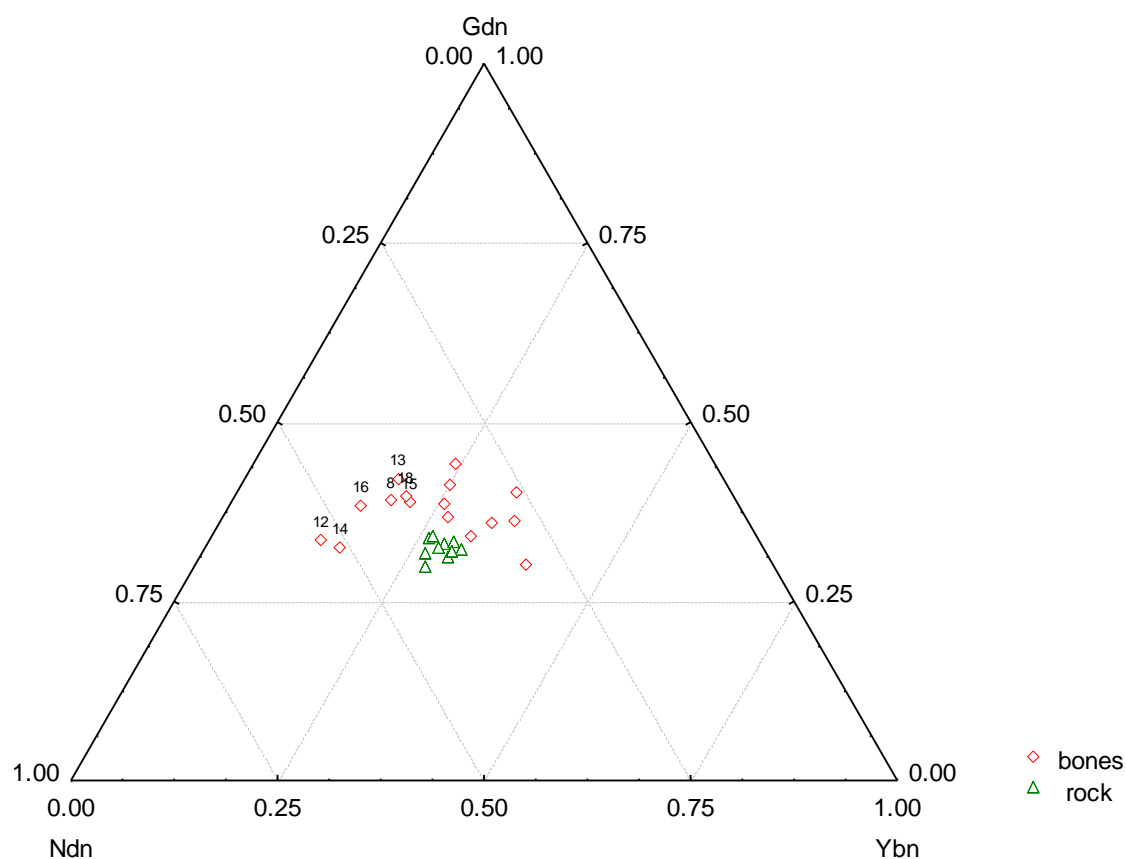


Рис. 5. Сопоставление состава РЗЭ костных остатков и четвертичных отложений

Обработка выборки проб костных остатков методом дискриминантного анализа дает возможность с достаточно высокой степенью корректности (85%) отнести их к соответствующим стратиграфическим уровням (табл. 4)

Значимыми (вносящими максимальный вклад в достоверность разделения образцов) являются цериевая аномалия (Ce^*), тетрадный эффект для первой тетрады (T_1), отношение ЛРЗЭ / ТРЗЭ ($p < 0,05$) (табл. 5). То есть основное

значение имеет фракционирование легких РЗЭ.

На рис. 6 показана диаграмма рассеяния канонических значений. По диаграмме рассеяния можно сделать вывод, что переотложены пробы 4, 17 и, видимо, 9 (*Clethrionomys rufocanus*, *Lagurus lagurus* – рыжая полевка и степная пеструшка). Соответственно, копытный лемминг (*Dicrostonyx*, образец 10) не мог существовать со степной пеструшкой в одном биотопе.

Таблица 4

Результаты дискриминантного анализа выборки по параметрам Ce^* , T_1 , T_3 , T_4 , ЛРЗЭ / ТРЗЭ, La / Sm, La / Yb

	Количество образцов	Percent Correct	МИС 2	МИС 3	МИС 4	МИС 5
МИС 2	3	66	2	1	0	0
МИС 3	4	100	0	4	0	0
МИС 4	4	100	0	0	4	0
МИС 5	4	75	1	0	0	3
Total*	15	85	3	5	4	3

Примечание. * Горизонт МИС 1 исключен из рассмотрения, так как представлен только одним образцом.

Итоги анализа дискриминантных функций в модели

	Лямбда Уилкса	Частная лямбда	F-исключ. (3,6)	p-уровень
La/Sm	0,006	0,630	1,176	0,394
Ce*	0,014	0,266	5,519	0,037
La/Yb	0,009	0,403	2,960	0,120
T ₁	0,020	0,185	8,802	0,013
LREE/HREE	0,016	0,228	6,767	0,024
T ₄	0,007	0,550	1,635	0,278
T ₃	0,006	0,638	1,135	0,408

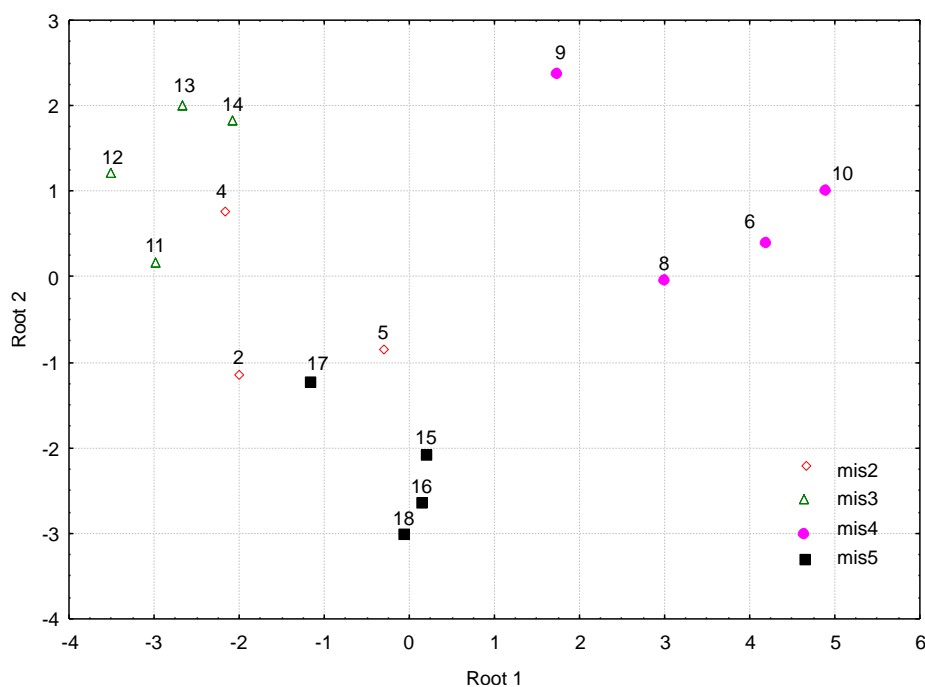


Рис. 6. Диаграмма рассеяния канонических значений

Заклучение. Результаты изучения спектров РЗЭ в эмали зубов мелких млекопитающих, собранных из разных горизонтов Усть-Одинского разреза, показали, что различный уровень накопления РЗЭ в образцах костных остатков в пределах каждого из горизонтов дает возможность сделать вывод об изменениях физико-химических условий среды диagenеза и о возможности применения геохимических коэффициентов, отражающих фракционирование РЗЭ, для классификации выборки. Метод дискриминантного анализа позволяет выделить группу параметров, дающую оптимальное разделение между предполагаемыми группировками, характеризующими раз-

личные стратиграфические уровни разреза. Значимыми (вносящими максимальный вклад в достоверность разделения образцов) являются цериевая аномалия (Ce*), тетрадный эффект для первой тетрады (T₁), отношение ЛРЗЭ / ТРЗЭ ($p < 0,05$). Показано, что в рассматриваемой выборке присутствуют переотложенные костные остатки.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 15-35-20293.

Библиографический список

1. Балашов Ю.А. Геохимия редкоземельных элементов. М.: Наука, 1976. 268 с.

2. Иванова В.В. Редкоземельные элементы в отложениях плейстоцена Центральной и Восточной Якутии // Геоморфология и палеогеография полярных регионов: материалы совм. Междунар. конф. СПб., 2012. С. 199–203.
3. Иванова В.В., Никольский П.А. Использование РЗЭ для корректной датировки подъемного палеонтологического материала по стратиграфическим горизонтам типоморфных голоцен-плейстоценовых разрезов приморских низменностей Северной Якутии // Геология, геохимия и экология Северо-Запада РФ: материалы I Междунар. науч. конф. СПб, 2005. С.121–128.
4. Каргинский мегаинтерстадиал Прибайкалья: геохронология и палеогеография / Х.А. Арсланов, Н.Е. Бердникова, Г.А. Воробьева, И.В. Енущенко, Д.В. Кобылкин, Ф.Е. Максимов, Ю.В. Рыжов, А.А. Старикова, СБ. Чернов // Квартер во всем его многообразии: материалы конф. Т. 1. Апатиты: Изд-во ГИ КНЦ РАН, 2011. С. 39–42.
5. Ископаемая фауна млекопитающих Усть-Одинского местонахождения (верхний плейстоцен, Предбайкалье) / А.А. Щетников, А.М. Клементьев, Е.Ю. Семеней, А.В. Сизов, И.А. Филинов, В.В. Никитёнок // Байкальский зоологический журнал. 2012. № 2 (10). С. 5–10.
6. Молотков Н.К. Некоторые вопросы геоморфологии Предсаянья // Проблемы геоморфологии Восточной Сибири. Иркутск, 1979. С. 114–122.
7. Смирнов Н.Г., Киселева Д.В., Вотяков С.Л. О природе парадоксального сообщества грызунов // Экология. 2012. № 1. С. 74–76.
8. Усть-Одинский опорный разрез верхнего плейстоцена Иркутского амфитеатра Сибирской платформы: лито- и геохимические особенности / В.В. Иванова, А.А. Щетников, И.А. Филинов, С.В. Вещева, А.Ю. Казанский, Г.Г. Матасова // Lithology and Mineral Resources. 2015.
9. Филиппов А.Г., Ербаева М.А., Хензыхенова Ф.И. Использование верхнекайнозойских мелких млекопитающих юга Восточной Сибири в стратиграфии. Иркутск: Изд-во ВостСибНИИГГиМС, 1995. 117 с.
10. Elderfield H., Greaves M.J. The rare earth elements in seawater // Nature. 1982. V. 296. P. 214–219.
11. Guthrie R.D. Frozen Fauna of the Mammoth Steppe: The story of Blue Baby. Chicago and London: Univ. of Chicago Press, 1990. 323 p.
12. Hibbard C.W. An Interpretation of Pliocene and climates in North America // President Address, Report Mich. Acad. Sci., Arts, Letters (for 1959–1960). 1960. P. 5–30.
13. Kazansky A.Y., Matasova G.G., Shchetnikov A.A. Correlation between rock magnetic and grain-size parameters in Quaternary deposits of Ust-Oda key section (Baikal region) // International workshop on paleomagnetism and rock magnetism. Books of abstracts. Tatpoligraph publishing house, 2013. С. 32–34.
14. Millard A.R., Hedges R.E.M. A diffusion-adsorption model of uranium uptake by archaeological bone // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1996. V. 60. P. 2139–2152.
15. Paleoenvironment of the Fore-Baikal region in the Karginian Interstadial: Results of the interdisciplinary studies of the Bol'shoj Naryn site / T. Sato, F.I. Khenzykhenova, A. Simakova, G. Danukalova, E. Morozova, K. Yoshida, D. Kunikita, H. Kato, K. Suzuki, E. Lipnina, G. Medvedev, N. Martynovich // Quaternary International. 2014. V. 333. P. 146–155.
16. Patterns of chemical change during bone fossilization / P. Henderson, C.A. Marlow, T.I. Molleson, C.T. Williams // Nature. 1983. V. 306. P. 358–360.
17. Peppard D.F., Mason G.W., Lewey S. A tetrad effect in the liquid-liquid extraction ordering of lanthanides (III) // J. Inorg. Nucl. Chem. 1969. V. 31. P. 2271–2272.

18. Tetrad effect in rare earth element distribution patterns: A method of quantification with application to rock and mineral samples from granite-related rare metal deposits / T. Monecke, U. Kempe, J. Monecke [et al] // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 2002. V. 66. I. 7. P. 1185–1196.

19. The North American Shale Composit: Its composition, major, and trace element characteristics / L.P. Gromet, R.F. Ду-

мек, L.A. Haskin, R.L. Korotev // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 1984. V. 48. P. 2469–2482.

20. Trueman, C.N., Benton, M.J. A geochemical method to trace the taphonomic history of reworked bones in sedimentary settings // *Geology*. 1997. V. 5. P. 263–266.

Статья поступила 01.09.2015 г.