

На правах рукописи

Иванова Варвара Викторовна

**ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИНДИКАТОРЫ ПАЛЕОКЛИМАТИЧЕСКИХ И
ПАЛЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ РЕКОНСТРУКЦИЙ КРИОГЕННЫХ
ЛАНДШАФТОВ (НА ПРИМЕРЕ ОПОРНЫХ РАЗРЕЗОВ ПЛЕЙСТОЦЕНА
ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ)**

1.6.14 – Геоморфология и палеогеография

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора географических наук

Санкт-Петербург-2023

Работа выполнена в Лаборатории мониторинга недр Федерального государственного бюджетного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана имени академика И.С. Грамберга»

Официальные
оппоненты:

Куницкий Виктор Владимирович, доктор географических наук, главный научный сотрудник Лаборатории общей геокриологии, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук (ИМЗ СО РАН), г. Якутск

Рыжов Юрий Викторович, доктор географических наук, заведующий лабораторией геологии мезозоя и кайнозоя, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН), г. Иркутск

Таловина Ирина Владимировна, доктор геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой исторической и динамической геологии, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» (СПГУ, Горный университет), г. Санкт-Петербург

Ведущая
организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Северо-Восточный Комплексный научно-исследовательский институт им. Н. А. Шило Дальневосточного отделения Российской академии наук (СВКНИИ ДВО РАН), г. Магадан

Защита состоится 30 июня 2023 года в 11 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук 33.2.018.02, созданного на базе Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена, по адресу: 191186, г. Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, 48, корп.12, ауд. 21.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена (191186, г. Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, 48, корп.5) и на сайте университета по адресу https://disser.herzen.spb.ru/Preview/Karta/karta_000000901.html.

Автореферат разослан « » _____ 2023 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к. г. н., доцент

Ирина Евгеньевна Сазонова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Хотя окружающая среда позднего плейстоцена и голоцена Северной Евразии изучена довольно подробно, многие важные аспекты остаются неясными, в том числе история палеогеографии равнинных и предгорных территорий, включая изменение палеоклиматических событий за последние сотни тыс. лет. Четвертичные отложения северо-востока региона наиболее активно изучались в 50-70-е годы XX столетия. В течение последних 25 лет при реализации различных международных программ и проектов получен значительный объем новых данных. Однако при большом количестве собранного фактического материала, палеогеографическая и климатическая изученность плейстоцена Восточной Сибири крайне неравномерна, поскольку в предыдущих исследованиях часто преобладали региональные и отраслевые аспекты. Высокая актуальность исследований отложений плейстоцена как полигенетичного субстрата покровного комплекса – на наименее изученной территории сочленения аккумулятивных, денудационно-аккумулятивных и денудационных участков – сохраняется уже свыше последних ста лет.

При отсутствии прямых датировок отложений плейстоценового интервала, выходящего за пределы радиоуглеродного метода, синхронные палеоэкологические реконструкции Северной Евразии, климатические сигналы и геологические события, заархивированные в четвертичных отложениях, не всегда достаточно однозначны, что предопределяет привлечение биохронологических данных об остатках плейстоценовых млекопитающих, являющихся чутким индикатором палеоклиматических обстановок. Однако большинство ключевых находок фауны обнаружено не *in situ*, прочие происходят из проблематично датированных разрезов, что снижает их биохронологический и корреляционный потенциал. Поэтому несомненна актуальность разработки методических приемов стратиграфической привязки палеонтологического материала.

В реализации задач, возникающих при изучении и освоении четвертичных отложений Российской Арктики, геохимическим исследованиям принадлежит важное место. Тонкозернистые алюмосиликокластические осадки являются источником информации для палеоэкологических реконструкций, изучения состава источников сноса, окислительно-восстановительных обстановок осадконакопления, решения разнообразных проблем седименто- и литогенеза. В качестве палеоэкологических индикаторов автором, наряду со стандартными литостратиграфическими характеристиками, используемыми для палеогеографических реконструкций, обосновываются геохимические коэффициенты, рассчитанные с использованием особенностей распределения редкоземельных элементов (РЗЭ).

Совершенствование и уточнение критериев реконструкции изменений природной среды и климата имеет важное теоретическое и практическое значение для характеристики палеогеографического и палеоэкологического облика криолитозоны Северной Евразии. Исследование именно арктических геосистем является ключевым для оценки возможных ответных реакций климата на антропогенное вмешательство, в высоких широтах особенно заметное.

Цель диссертационного исследования:

- определить закономерности накопления и диагенеза позднекайнозойских отложений Восточной Сибири и разработать систему геохимических индикаторов для реконструкции палеоклиматических и палеоэкологических условий равнинных и предгорных территорий криолитозоны Восточной Сибири в плейстоцене.

Задачи исследования определялись необходимостью обеспечения комплексного подхода к изучению осадочного чехла плейстоцена, а именно:

- 1) проанализировать распределение РЗЭ в четвертичных отложениях Восточной Сибири;
- 2) разработать геохимические критерии реконструкции условий диагенеза позднекайнозойских отложений и обосновать цифровые коэффициенты, характеризующие палеоэкологические параметры этого процесса;
- 3) выполнить геоинформационный пространственный анализ геохимических индексов для палеоэкологических реконструкций обстановок седиментации на основе индикаторных свойств спектра лантаноидов;
- 4) уточнить существующие реконструкции условий накопления четвертичных отложений приморских низменностей, шельфа и арктических архипелагов Восточной Сибири, а также палеокриогенной области юга Восточной Сибири;
- 5) разработать методику стратиграфической идентификации подъемного палеонтологического материала в целях улучшения разрешающей способности биостратиграфического анализа.

Объектом исследования являются четвертичные отложения синкриогенных и эпикриогенных толщ северо-восточной части Восточной Сибири и палеокриогенных толщ юга региона, сформировавшиеся как результат длительной геологической эволюции области в перигляциальных палеогеографических условиях, главным образом, в неоплейстоцене–голоцене.

Предмет исследования - выявление геохимических особенностей позднекайнозойских отложений для реконструкции палеоклиматических и палеоэкологических условий равнинных и предгорных территорий криолитозоны Восточной Сибири в плейстоцене.

Методика работ. Решение поставленных задач и повышение достоверности результатов достигается комплексным, детальным и планомерным изучением реальных природных объектов на основе информативных полевых материалов. Синтез научных направлений (палеонтология, литология, геохимия и др.) и использование прецизионных методов лабораторных исследований при этом обеспечивает соответствие результатов мировому уровню.

Использованы эмиссионные спектральные определения широкого круга химических элементов, рентгено-флуоресцентные определения по схеме силикатного анализа, а также исследования гидрохимических проб, гранулометрические и минералогические исследования горных пород и продуктов их выветривания (лаборатории ВСЕГЕИ, ГИН, ВНИИОкеангеологии, ЦКП ИЗК СО РАН), количественные определения элементного состава твердой и жидкой фазы льда и природных вод; органо-минеральных компонентов отложений ледового комплекса; ископаемых костных остатков методом ICP-MS (лаборатория ICP-MS анализа Центра качества воды Водоканала Санкт-

Петербурга; лаборатория ЦКП ИГХ СО РАН). Осуществлена хронологическая привязка изучаемых разрезов в основных исследовательских центрах РФ (Санкт-Петербург, ИМК РАН; Москва, ГИН РАН, Новосибирск, ЦКП «Геохронология кайнозоя»). В ходе исследований широко применялись методы математической обработки данных и различные модификации многомерной статистики.

Фактический материал. Получен при непосредственном участии автора: элементный и гранулометрический состав образцов из 15 опорных разрезов верхнекайнозойских отложений Восточной Сибири, включающих разрезы синкриогенных и эпикриогенных толщ ее северо-восточной части и разрезы палеокриогенных толщ юга Восточной Сибири (рис.1), элементный состав различных типов природных вод и ископаемых льдов (Новосибирские острова и Северное Верхоянье), элементный состав ископаемых костных остатков.

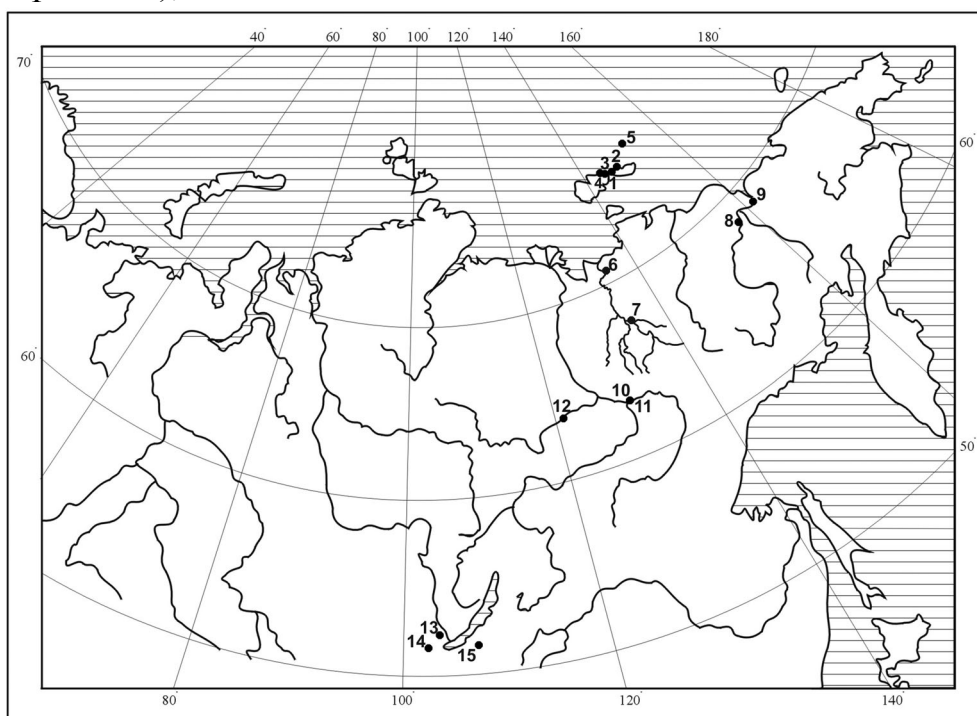


Рис.1. Объекты изучения: 1 – береговые разрезы бухты Мира (о.Новая Сибирь); 2 – м. Плоский (о.Новая Сибирь); 3 – м.Благовещенский (о.Фаддеевский); 4 – м.Сана-Балаган (о.Фаддеевский); 5 – Северная лагуна о. Жохова; 6 – Соп-Хая (р.Яна-195); 7 – Улахан-Суллар (р.Адыча); 8 – р.Крестовка; 9 – р.Малый Анюй; 10 – Чуйское обнажение; 11 – Тандинское обнажение; 12 – Харабай (р. Виллой); 13 – Усть-Одинское обнажение (р. Китой); 14 –Белый Яр (Тункинская долина, р. Иркут); 15 – ур.Тологой (р.Селенга)

Объем выборок в общем составляет более 700 литохимических проб, 104 гидрохимические пробы и 96 образцов костных остатков. Также привлекались геологические и геохимические материалы из публикаций Н.А.Шило, Н.Г.Патык-Кара, В.М.Питулько, В.Н.Макарова, С.В.Томирдиаро, В.Б. Спектора, А.В. Ложкина, С.В.Лещинского, П.С.Минюка, А.В.Шера, Т.Н.Каплиной, Н.А.Кинд, К.Трумэна и многих др.

Научная новизна результатов состоит в установлении неизвестных ранее фактов и получении следующих новых материалов:

1. Впервые охарактеризована история палеогеографического развития и изменение палеоклиматических условий в позднем плейстоцене для обширного

региона Восточной Сибири: слабо изученной территории сочленения аккумулятивных, денудационно-аккумулятивных и денудационных участков, характеризующейся развитием мерзлых пород.

2. Впервые при интерпретации опорных разрезов плейстоцена подтверждена информативность распределения лантаноидов в глинистой фракции рыхлых отложений для уточнения условий образования позднекайнозойских разрезов Восточной Сибири.

3. Разработана методика идентификации подъемного фаунистического материала на основе закономерностей распределения лантаноидов, в т.ч.:

- оценены изменения состава грунтовых вод, контактирующих с ископаемыми костными остатками в течение длительного времени;

- апробированы приемы визуализации геохимических спектров РЗЭ для палеоэкологических реконструкций (построение зависимостей пар РЗЭ; тройные диаграммы Nd_N , Gd_N и Yb_N , нормализованных по $NASC^1$, для различных типов природных вод, тонкой фракции осадочных пород и ископаемых костных остатков (КО);

- впервые показано, что возможно определить наличие криогенных условий при фоссилизации костных остатков на основе особенностей их геохимических спектров РЗЭ (отрицательная аномалия Се и повышенное содержание средних и тяжелых членов спектра среди РЗЭ в костных остатках);

- показана возможность корреляции гомологичных терригенных и биогенных отложений по типу и величине тетрад-эффекта лантаноидов.

4. Впервые проведена количественная оценка содержаний РЗЭ в разнофациальных четвертичных отложениях перигляциальной зоны России

5. Впервые новой методикой и одним исполнителем геохимически изучены разрезы, отличающиеся различной геоморфологической обстановкой, по трансекту длиной почти 3500 км, что позволило сравнить палеоэкологическую и палеогеографическую обстановку в плейстоцене для разных районов региона.

Защищаемые положения. На защиту выдвигаются следующие принципиальные положения:

1. Изменения в спектрах распределения редкоземельных элементов в глинистой фракции отложений разрезов криогенных толщ, выраженные в деплетировании легких членов спектра, являются индикатором процессов криогенеза. Они установлены во всех изученных разрезах и связаны с особенностями перераспределения РЗЭ между твердой и жидкой фазой в профиле криогенной коры выветривания.

2. Характер распределения редкоземельных элементов в ископаемых костных остатках служит индикатором палеоэкологических условий фоссилизации и является диагностическим признаком стратиграфической принадлежности палеонтологических объектов, сохраняющимся при их переотложении.

¹ NASC - североамериканский сланец, составной стандарт из сорока мелкозернистых осадочных и метаосадочных пород, в основном из Северной Америки [Gromet et.al, 1984]

3. Проявленный в спектрах редкоземельных элементов глинистой фракции рыхлых отложений изученных разрезов плейстоцена Восточной Сибири тетрадный эффект фракционирования лантаноидов зависит от обстановки осадкообразования. Тип и величина тетрадного эффекта служит показателем физико-химических и палеоклиматических условий осадконакопления.

4. Ассоциации палеоэкологических индикаторов, характеризующих распределение РЗЭ в покровных отложениях Восточной Сибири, исследованные автором по направлению меридионального трансекта (архипелаг Де-Лонга - оз. Байкал), обладают слабой изменчивостью, что в сопоставлении с биостратиграфическими данными свидетельствует о существовании в этой части криолитозоны в неоплейстоцене - голоцене открытых ландшафтов.

Достоверность и обоснованность полученных результатов базируется, в первую очередь, на использовании классических приемов изучения многолетнемерзлых четвертичных отложений с учетом их криогенного строения и оценки роли льда в криолитологических проявлениях (криотурбации, морозная сортировка материала по теплофизическим свойствам, формирование повторно-жильных льдов и полигональных грунтов). Большое значение имеет корректное использование статистических процедур обработки литолого-геохимических данных, метрологический контроль анализов и соблюдение правил формирования выборок, обеспечивающих статистическую устойчивость наблюдаемых зависимостей.

Репрезентативность результатов подтверждается опубликованными в литературе близкими содержаниями редких земель в четвертичных отложениях и почвах на территории Восточной Сибири и других регионов, а также большим объемом аналитического материала: 700 анализов ICP-MS рыхлых отложений, костных остатков, ископаемых льдов и природных вод, более 700 определений содержаний оксидов породообразующих элементов химическим методом и с помощью рентгено-флуоресцентного анализа. Использовались программные пакеты Statistica 10.0, Strater 4.0, Arcgis 9.3.1, Rockware Logplot, GRADISTAT [Blott, Pye, 2001].

Теоретическая ценность. В работе проведено теоретическое обоснование использования геохимических индексов вообще и особенностей фракционирования РЗЭ, для палеогеографических реконструкций в позднем плейстоцене в районах с недостаточным развитием биостратиграфических исследований и практическим отсутствием абсолютных датировок в частности, при изменении палеоэкологических обстановок (смена коренного субстрата в пределах областей мобилизации рыхлого материала на поверхностях выравнивания, колебания аридности и гумидности в пределах четвертичного климатического цикла, перенос и переотложение продуктов криогенного выветривания, развитие криогенных процессов). Исследования автора позволяют выявлять по геохимическим спектрам РЗЭ костных остатков геохимические характеристики вмещавших их отложений, что дает возможность стратиграфической привязки подъемного палеонтологического материала.

Практическая значимость. Расширена существующая база палеоэкологических данных для проведения более надежных реконструкций природной среды и климата позднего плейстоцена Восточной Сибири по таким практическим направлениям, как:

- комплексирование палеоэкологических геохимических индикаторов для оценки условий формирования четвертичных отложений Арктики;
- повышение геологической эффективности реконструкций природной среды и климата позднего плейстоцена Восточной Сибири на базе комплексирования геохимических индикаторов;
- расширение информационной основы палеоэкологических реконструкций в пределах полярного покровного комплекса;
- разработка методики стратиграфической привязки подъемного палеонтологического материала.

Полученные результаты позволяют получить информацию о фациальной характеристике отложений ледового комплекса, что важно при проведении регионального геологического картирования четвертичных отложений. В частности, эти данные были использованы в комплекте ГК 1000/3 лист S-53, 54 (Новосибирские острова), вышедшем в 2016 г., и в дальнейшем могут составить основу региональной информационной базы для дополнительного геокриологического блока в системе Государственного мониторинга состояния недр. Научные разработки и основные положения диссертации использованы в практической работе ИГХ СО РАН и ГИН СО РАН по следующим проектам:

- ИГХ СО РАН: проект 3.1 в Интеграционной программе ИИЦ СО РАН № 0341-2016-0001: Динамика и устойчивость природных экосистем Восточной Сибири в условиях изменения глобального и регионального климата и возрастающей антропогенной нагрузки; проект № 075-15-2019-866 «Байкальская Сибирь в каменном веке: на перекрестке миров»; отчет о научно-исследовательской работе по теме: Эволюция экосистем Внутренней Азии в позднем кайнозое – экологические сценарии (2019);

- ГИН СО РАН: проект IX.127.1.5. Динамика биогеоценозов, формирование осадочного чехла, природная среда и климат позднего кайнозоя Байкальской Сибири и Северной Монголии в контексте глобальных и региональных событий - 2017-2020 гг.

Личный вклад автора состоит в обосновании идеи работы и ее реализации путем постановки исследованной проблемы, формировании методологии ее решения, обобщении данных и разработке инновационной технологии палеоклиматических реконструкций плейстоценовых отложений криолитозоны. Работа является итогом двадцатилетних исследований автора в различных мерзлотных регионах России. Изложенные в диссертации научные результаты и выводы полностью принадлежат автору и получены при ее непосредственном участии в ряде научно-исследовательских проектов.

Самостоятельно определены цель и задачи исследований. Предложен оптимальный режим подготовки палеофаунистических остатков. Выполнена математическая обработка данных методами многомерной статистики и графическое представление результатов. Разработана методика применения

геохимических данных для палеоэкологических реконструкций условий образования четвертичного покровного комплекса Восточной Сибири.

Исследования были реализованы в рамках научно-исследовательских работ ГИН РАН, ИГХ СО РАН и ГИН СО РАН по программе фундаментальных научных исследований Академии наук на 2013–2020 годы, Раздел IX "Науки о Земле", подраздел 127 "Динамика и механизмы изменения ландшафтов, климата и биосферы в кайнозое, история четвертичного периода"; по проектам ГИН РАН «Разработка детальных стратиграфических схем плиоцена-квартера для различных палеогеографических зон Северной Евразии» и «Плейстоцен и голоцен приполярных областей Российской Арктики, стратиграфия, биота, палеоклимат и палеогеография» и ИИМК РАН по международной программе «Высокоширотная Арктика: Природа и Человек».

Исследования поддержаны грантами РФФИ №№ 10-05-01062-а; 11-06-12018-офи-м-2011; 12-05-00904-а; 13-05-01128-а; 15-05-01858-а, 15-05-01644-а) и РФФИ (№ 16-17-10079), в которых автор работы принимала личное участие как в проведении полевых работ, так и в получении научных результатов.

Апробация работы. Результаты исследований, изложенные в диссертации, доложены и обсуждены на VIII гляциологическом симпозиуме (СПб., 2004); конференции «Геология, геохимия и экология Северо-Запада РФ» (СПб., 2005); VI, VII, IX, X Всероссийских совещаниях по изучению четвертичного периода (2007-2011, 2015; 2017); Международной мамонтовой конференции (Якутск, 2007); совещании «Моря высоких широт и морская криосфера» (СПб., 2007); XLII Тектоническом совещании (Москва, 2009); конференции «Геология, география и экология океана» (Ростов-на-Дону, 2009); VII и VIII Саксовских чтениях по палеогеографии мезозоя и кайнозоя бореальных районов (Новосибирск: 2011; 2021); «Геоморфология и палеогеография полярных регионов» (СПб., 2012); Геология и минерально-сырьевые ресурсы Европейского Северо-Востока России (Сыктывкар, 2014); Марковских чтениях (2015, 2020); VI-th and VII-th International Conference on Mammoths and their Relatives (Греция, 2014; Тайвань, 2017); III-rd ASQUA Conference, Jeju Island, Korea (2017) и др.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 58 работ: 22 статьи из списка ВАК (в т.ч. 12 - в журналах, индексируемых Web of Science и Scopus; 5- Scopus и Ринц, 6- Ринц), 3 статьи в научных журналах, 33 в сборниках материалов международных, всероссийских и региональных научных конференций.

Объем и структура диссертации. Методология и цель определили план, структуру и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованных источников (816 наименований) и Приложения. Общий объем работы - 409 страниц, включая 40 таблиц и 141 рисунок.

Благодарности. В ходе исследований автор неоднократно обсуждала основные положения работы с проф. В.В.Гордиенко, конструктивные замечания которого стимулировали разработку ряда важных вопросов. Ценные советы были даны автору докторами геолого-минералогических наук А.Е. Рыбалко, А.Ю.Казанским и А.Ю.Опекуновым, кандидатами геолого-минералогических наук П.А.Никольским, И.А.Токаревым и М.А.Анисимовым, а также кандидатом исторических наук В.В.Питулько. Большую помощь оказали непосредственные

соисполнители работ А.А.Щетников, И.А.Филинов, Г.Г.Боескоров, И.Н.Белолобский и др., которым автор выражает искреннюю признательность и благодарность.

Основное содержание работы

Методология исследований последовательно изложена в первой половине работы с дальнейшим обоснованием системы научных доказательств защищаемых принципиальных положений.

Введение. Исследование изменений природной среды в плейстоцене показывает масштабы актуальности исследуемой научной проблемы, имеющей важное теоретическое и практическое значение. Для реконструкции природных условий и изменения климата в позднем плейстоцене изучаемого района привлечены методы анализа петрохимических модулей и геохимических коэффициентов, использующих особенности распределения РЗЭ в ходе мобилизации, транспортировки и седиментации продуктов гипергенеза. Автор показывает, что геохимическая характеристика четвертичных отложений арктических геосистем в ряде случаев играет ключевую роль для палеоклиматических реконструкций, особенно в районах, слабо обеспеченных биостратиграфическими данными.

Глава 1. Условия формирования полярного покровного комплекса.

Сформировавшиеся в течение последних двух с половиной миллионов лет четвертичные отложения и формы рельефа Арктики представляют сложную систему различных аккумулятивных тел и эрозионных форм, возникших в морских, субаэральных и флювиальных обстановках. В восточном секторе Российской Арктики, от архипелага Северная Земля до Чукотки, регрессивный морской режим совпадает с почти полным осушением шельфов Восточно-Арктических морей, развитием криогенных процессов, формированием субаэральных толщ [Osterkamp, 2001; Brown et al., 2001; Романовский, Тумской, 2011; Vandenberghe et al., 2014; Lindgren et al., 2015, 2016 и др.]. Исследование четвертичного покрова Восточной Арктики чрезвычайно затруднено (осложнено) тем, что исходные генетические признаки покровных образований часто оказываются затушеванными последующими криогенными их трансформациями и наложением высокопорядковых локальных процессов литификации, литостратификации и дифференциации терригенного вещества.

Полярный покровный комплекс [Попов, 1958], понимаемый нами как синоним криогенной коры выветривания, разделяется на две подзоны: верхнюю - гипергенную (сезонноталый слой), где миграция веществ происходит при положительной температуре, и нижнюю - криогенную (остальная часть полярного покровного комплекса), где миграция элементов идет при отрицательной температуре. Подзона криогенеза характеризуется выносом Са, Mg, Fe, Mn, Ti, Si, K, Na. [Питулько, 1977; Макаров, 1988; Шварцев, 1998; и др.] Масштабы криогенного выветривания зависят от дисперсности пород и возраста современного ландшафта. Коэффициенты накопления химических элементов в продуктах выветривания по отношению к исходной породе) остаются довольно постоянными (Таблица 1).

Таблица 1. Транслокационные коэффициенты², определяющие химический состав продуктов криогенного выветривания

Компоненты коры выветривания	
Твердая фаза (K_n)	Грунтовые воды (K_x)
<p>весьма подвижные: (< 0.5) Ca, Mg, S подвижные: (0.5-0.7) Co, Ni, Mn, Cr слабоподвижные:(0.7-0.9) Cu, Zn, Mo, Ag, U весьма слабо подвижные:(0.9-1.1) Na, K, Si, Al, V инертные: (> 1.3) Sn, Pb, P, Fe, Ti, PЗЭ, Zr, Au</p>	<p>очень подвижные: (>10) S, Zn, Mg, Ca, Mo легкоподвижные: (1-10) Cu, Ni, Na, Ag подвижные: (0.1-1.0) Mn, Cr, Y, Co, Fe, Pb, Ba слабоподвижные: (0.01-0.1) Al, Si, Sn весьма слабоподвижные: (< 0.01) Ti, Au, Nb, Zr</p>

Сфера криогенного выветривания охватывает не только рыхлый покров, но и верхнюю часть скальных мерзлых пород. Мощность полярного покровного комплекса, определяющаяся глубиной проникновения морозобойных трещин, составляет в среднем 5-6 м. Характерными чертами продуктов криогенной коры выветривания являются: постоянно существующая ассоциация жидкой и твердой фаз воды, значительные амплитуды температурных напряжений и обогащенность фракцией пыли, пополняющейся как в результате морозного дробления более крупных частиц, так и за счет вторичных микроагрегатов, возникающих при взаимодействии производных химического распада.

Порядок распределения компонентов по подвижности одинаков для элювия, склоновых образований и донных илов, что свидетельствует о тесной связи эндогенных и гипергенных геохимических полей, искажаемой лишь почвенными и геокриологическими процессами.

С пленочными водами из подзоны криогенеза в сезонноталый слой поступают Ca, Mg, Zn, Si, U, Ni, Co, Y, Ti, Nb, Fe, Mn, активно выносимые затем, за исключением Ti, Nb, Si, из надмерзлотного горизонта. В подзоне гипергенеза набор подвижных компонентов расширяется за счет Mo, Cu, K, Na, Cr, Pb, Ag, миграция которых, следовательно, происходит в основном при положительной температуре. В целом намечается следующий ряд водных мигрантов:

(S, Zn, Mg, Ca, Mo) – (Cu, Ni, Na, Ag) – (Mn, Cr, Y, Co, Fe, Pb, Ba) – (Al, Si, Sn) – (Ti, Au, Nb, Zr).

Выдержанность значений K_n и K_x - свидетельство единой направленности и интенсивности процессов выветривания в криолитозоне. Наиболее важными особенностями криогенных кор выветривания являются:

- ведущая роль льда и фазовых переходов воды как агентов миграции вещества (морозная сортировка, вымораживание обломков, пучение, пятнообразование, крип, солифлюкция и др.);
- слабая механическая и фациальная дифференциация осадков;
- почти полное замещение в спектре склоновых процессов плоскостного смыва морозной сортировкой, суффозией и солифлюкцией;

² **Транслокационный показатель** – характеризует способность химических веществ переходить из горных пород в продукты выветривания (K_n), из пород и продуктов выветривания в природные воды (K_x)

- термическая неустойчивость возникающих геоморфологических элементов (особенно при сингенетическом промерзании);
- песчано-алевритовый тип остаточных и переотложенных продуктов выветривания, гидрослюдистый состав глинистых новообразований;
- в процессе циклического промерзания-протаивания происходит активная диспергация и деградация глинистых частиц, причем наибольшие изменения присущи гидрослюдам, которые трансформируются в смешаннослойные слюдо-сметитовые образования [Конищев, Рогов, 2008].

Анализ изменения миграционных характеристик (K_n и K_x) продуктов дезинтеграции горных пород свидетельствует о существовании ряда геохимических барьеров на пути миграции элементов в мерзлотных ландшафтах. Первый из них возникает на рубеже подзон криогенеза и гипергенеза при переходе от связанной воды к объемной фазе растворов. Общее увеличение подвижности элементов на нем сопровождается замедлением выноса Ti, Si, K и Na. Второй барьер имеется в пределах почвенного профиля и вызван изменением окислительно-восстановительных условий. На фоне развития глеевых процессов (в различной степени) заметно влияние сорбции. Нередко здесь же развивается и кислотно-щелочной барьер, накопление элементов на котором подчеркивает элювиально-иллювиальное перераспределение.

Грунтовые воды криолитозоны характеризуются высоким содержанием углекислого газа и органического вещества, так как низкие температуры способствуют увеличению их растворимости. Они имеют кислую реакцию, соответственно, силикаты разлагаются более интенсивно, более активно проходят реакции гидролиза.

Преобразование органического вещества (ОВ) в криолитозоне вследствие заторможенности биохимических реакций протекает медленно. Это приводит к преобладанию фульвокислот, характеризующихся высокой химической активностью и подвижностью в почвах.

Al и Fe в пределах криолитозоны мигрируют в коллоидной форме и в форме комплексных соединений с гумусовыми кислотами. В северных условиях значительно более подвижными становятся также и некоторые микроэлементы (Ti, Zn, Cu, Ni и др.), которые переносятся обычно в виде органокомплексов.

Преобразование осадка на ранней стадии диагенеза определяется в основном его исходным составом и наличием активных компонентов: коллоидных соединений Fe, Al и Mn, карбонатов, растворимых солей и др., присутствием ОВ и природой порового раствора. Окисление ОВ приводит к снижению содержания растворенного в поровых водах кислорода и, следовательно, к снижению Eh осадка. В основном, химические процессы раннего диагенеза приводят к увеличению щелочности поровых растворов. Специфика физико-химических процессов зависит от того, в какой обстановке происходит диагенез – в субаквальной или субаэральной.

Одной из дискуссионных и до сих пор не решенной проблемой геологического строения и палеогеографии Восточной Сибири является наличие так называемого «ледового комплекса» (ЛК) или едомных отложений. Они

представлены обширными участками богатых льдом дисперсных отложений. Суммарное количество льда в ЛК может достигать 80-90%. Мощность таких осадочных разрезов в арктических и субарктических районах Восточной Сибири превышает 50 м. Отложения, благодаря наличию мерзлоты, сохраняют разнообразие исключительных палеоэкологических архивов [Kaplina, Lozhkin, 1984, Guthrie, 1990; Лещинский, 2006, 2016; Гитерман, 1982, 1985, Shapiro and Hofreiter, 2014, Zimov et al., 2006 и др.].

В последние десятилетия было предложено несколько гипотез о происхождении ледового комплекса [Попов, 1960, 1967, 1975, 1983; Гравис, 1969; Лаврушин, 1962, 1963; Романовский, 1962, 1976, 1977; Анисимова, 1963, 1981; Катасонов, 1965; Кузнецова, 1965, 1978; Григорьев, 1966; Томирдиаро, 1980; Втюрин и др., 1984; Иванов, 1984; Каплина, 1987; Катасонов, 2009; Куницкий, 1978, 1981; 2007; Nagaoka et al., 1995; Большианов и др., 2013]. Согласно полигенетической схеме [Конищев, 1981; Васильчук и др., 1987; Зигерт, Слагода, 1990; Schirrmeister et al., 2011] едомные отложения накапливались при различных режимах, но в значительной степени контролировались сходными ландшафтными и геоморфологическими характеристиками, климатическими условиями, перигляциальными процессами и источником осадка. Основным признаком - наличие сингенетических ПЖЛ, остатков мамонтовой фауны и тундростепной флоры.

Радиоуглеродные датировки, полученные по фаунистическим остаткам, дают возможность предположить, что большая часть ледового комплекса имеет возраст от 40 до 13 тысяч лет [Васильчук и др., 2001]. Крайним случаем формирования ледового комплекса в островной зоне является образование пластовых залежей льда, что возможно лишь на арктических островах, где обеспечивается свободное пополнение избыточного ресурса воды.

Геоморфологически ледовый комплекс принадлежит к трем типам. Первый – склоны низких прибрежных гор, которые были основным источником осадков, и пологонаклонные аккумулятивные равнины с широко распространенными ПЖЛ, второй – криопланационные террасы на склонах гольцовых гор (Б. Ляховский остров, м. Святой Нос на побережье моря Лаптевых), острова Новосибирского архипелага (Бельковский, Столбовой и Котельный), которые обрамлены криопедиментами, образуемыми в перигляциальных условиях криогенными процессами, что свидетельствует о сильном перигляциальном выветривании. Третий морфотип находится в низменных районах вдали от горных хребтов. Полярный покровный комплекс также присутствует в Ленском бассейне в террасах нижних частей крупных горных долин.

Все аккумулятивные типы ландшафта, где распространен полярный покровный комплекс, характеризуются большими, относительно плоскими поверхностями с низким гидрологическим градиентом, что способствует длительному формированию сингенетических ПЖЛ. Низкая водообильность речной системы в конце плейстоцена, холодный аридный климат были важными факторами для формирования едомы.

Были обработаны собственные данные по изотопному составу ПЖЛ, собраны и обобщены все доступные литературные данные об изотопном составе

ПЖЛ Российской Арктики. Результаты сопоставлены с возрастным делением неоплейстоцена–голоцена в соответствии с морскими изотопными стадиями (МИС), по [Lisecki, Raymo, 2005]. Изотопные данные сингенетических ПЖЛ показывают, что чем восточнее находятся опробованные ПЖЛ, тем меньше в них изотопа $\delta^{18}\text{O}$. Эти изменения имеют линейный тренд для временных интервалов МИС 1-4 (рис. 2).

Примерно одинаковый характер трендов позволил И.Д.Стрелецкой с соавторами [Стрелецкая и др., 2014] сделать важный вывод об устойчивом характере атмосферной циркуляции в Восточной Арктике в последние 50 тыс. лет. В основу большинства существующих палеоэкологических реконструкций на этом временном промежутке положена интерпретация спорово-пыльцевых спектров, которые не являются полностью автохтонными, как показали исследования еще 1950-80-х годов [Букреева, 1965; Матвеева, 1965; Никитин, 1965; Суздальский, 1970; Динесман, 1984]. Кроме того, по материалам опорных разрезов четвертичных отложений, по определению, отображаются, в первую очередь, долинные фитоценозы.

Анализ имеющегося материала predeterminedил позицию автора в части динамического приоритета в палеогеографии изучаемого региона: в течение квартера происходила неоднократная смена глубоких похолоданий более теплыми обстановками, сопровождавшаяся миграциями растительных гиперзон к югу и обратно на 1000 – 1100 км [Волкова, 1965; Никитин, 1965; Волкова, Хлонова, 1980].

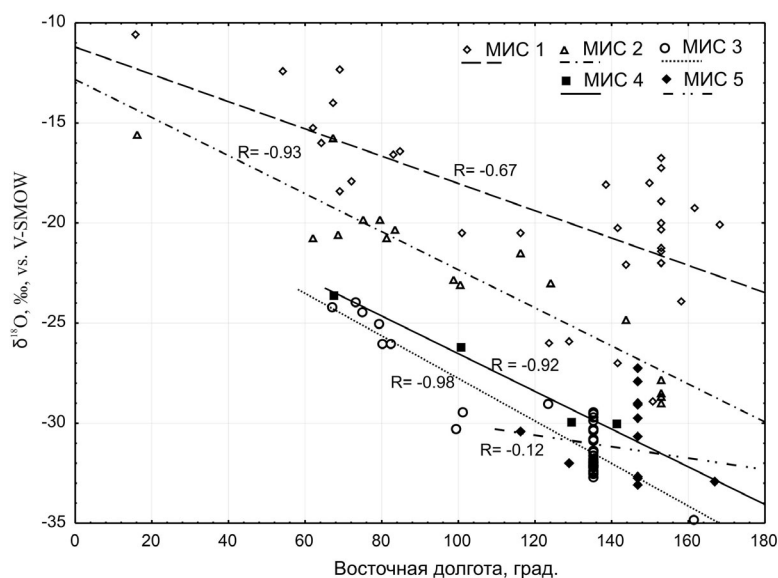


Рис. 2. Пространственное распределение значений изотопа $\delta^{18}\text{O}$ в ПЖЛ Российской Арктики и линии их трендов, по Г.Е.Облогову (2014, 2015) с дополнениями автора.

Накопленные за последние сто лет междисциплинарные данные убедительно поддерживают циклическое проявление динамического приоритета и его усложнение в позднем неоплейстоцене в рамках ледово-морской или ледниковой схемы взаимоотношения континента и арктических морей.

Хотя многие палеогеографические реконструкции XX века часто не подтверждены данными изотопного датирования, в значительной мере эти трудности могут быть преодолены с помощью палеоэкологических маркеров.

Важную информацию приносит изучение геохимических спектров РЗЭ в глинистой фракции четвертичных отложений и палеонтологическом материале. Именно это и позволяет решить одну из главных проблем для надежных палеогеографических реконструкций – вычленение автохтонной составляющей палеонтологических комплексов, на базе которой проводятся палеоэкологические интерпретации.

Глава 2. Методика палеоэкологических реконструкций. Геологические комплексы фиксируют обобщенную информацию обо всех климатических параметрах. Большую роль в этом сыграли исследования по экспериментальной петрологии, минералогии, моделированию низкотемпературных физико-химических преобразований горных пород Ж.Педро, П.В.Ивашова, А.В. Савенко и др.

Уже в 1960-е гг. было показано (Ф. Дж. Петтиджон и др.), что сведения о химическом составе осадочных пород могут быть использованы как для целей их классификации, так и реконструкции генезиса. Применение при исследовании терригенных пород системы литохимических модулей [Юдович, Кетрис, 2000, Маслов, 2005] и различных петрохимических коэффициентов [Nesbitt, Young, 1982, Fedo et al., 1995, Cox et al, 1995 и др.] дает возможность реконструировать состав и особенности преобразования пород в источниках сноса (оценивать палеоклимат на водосборах), физико-химические и геодинамические особенности обстановок осадконакопления.

Однако восстановление природных условий всегда опиралось на сопоставление валовых содержаний основных компонентов породных комплексов. Развитие приборно-методической базы современных геохимических работ открыло новые возможности решения рассматриваемых задач.

Для достоверной реконструкции климатических параметров циклов осадкообразования необходимо комплексное использование литологических, литохимических и геохимических данных [Фролов, 1992; Сочава и др., 1994; Интерпретация геохимических..., 2001; Подковыров, 2001; McLennan et al., 1993; Cullers, Podkovyrov, 2000].

Интегральный характер геохимических данных и показателей предопределяет приближенность выводов, а эквивалентность геохимических полей (породы и процессы разные, а концентрации элементов одинаковые) — вероятностную природу создаваемых информационных моделей.

Геохимические показатели обычно оцениваются с помощью методов параметрической статистики, которые требуют значительного внимания к вопросам создания однородных выборок и нормализации распределений. В диссертации рассмотрен весь арсенал литологических индикаторов климата и традиционные разновидности петрохимических модулей. В комплексе с классическими геологическими методами они обеспечивают идентификацию области сноса (микроэлементный состав литологических разностей сформированных отложений), а также установление связи между изменениями палеоэкологических условий и механизмом переноса осадков (Таблица 2).

Таблица 2. Петрохимические модули и индикаторы изучаемых разрезов: область сноса, зрелость осадков, маркеры палеоклимата

Петрохимические модули ¹	ГМ, ЖМ, ФМ, ТМ, АМ, НМ, НКМ, ЩМ , по [Юдович, Кетрис, 2000. Маслов, 2005 и др].
Индексы ²	СІА, СІW, ІСV, РІА , по [Nesbitt, Young, 1982, Fedo et al., 1995, Cox et al, 1995 и др.]
Индикаторные отношения	La/Co; La/Sc; Th/Co; Th/Sc; La/Co ; отношение ЛРЗЭ/ТРЗЭ и т.п., по [Тейлор, МакЛеннан, 1988, Cullers, 2000, Балашов, 1976, Дубинин, 2006 и др.]
Геохимические коэффициенты	Σ (РЗЭ+Y); ΣСe/ΣY ; тетрадный эффект T_i , где $i=1,3,4$ - (номера тетрад РЗЭ); цериевая и европиевая аномалии Сe* ; Eu* и др. по [Балашов, 1976; Irber, 1999, Monecke et al., 2000; Шатров, 2007, Иванова и др., 2011; Иванова, 2012, 2013, 2015б и др.]

1- гидролизатный модуль ГМ; железный ЖМ, фемический ФМ, титановый ТМ, алюмо-кремниевый АМ, натриевый НМ модули; модуль нормированной щелочности НКМ, щелочной модуль ЩМ. 2- индекс интенсивности химического выветривания СІА; химический индекс выветривания СІW, индекс зрелости осадков ІСV, индекс степени преобразования плагиоклазов РІА.

Недооценка процессов рециклинга и некорректное перенесение выводов, полученных для петрогенных осадков, на породы, прошедшие многократное переотложение, служат причинами возможных интерпретационных ошибок. В качестве корректирующего приема автором использован анализ геохимических особенностей спектров РЗЭ.

При последовательном использовании геохимических индикаторов палеоэкологических изменений резко возрастает детальность и устойчивость выводов (в силу массовости литохимического материала и применения прецизионной аналитики).

Сначала для характеристики условий выветривания на водосборах и оценки общего состава областей мобилизации рыхлого материала рассчитываются петрохимические модули. Затем на установленной таким образом палеогеографической шкале выделяются климатические маркеры.

В качестве последних автором обосновываются геохимические коэффициенты, использующие особенности распределения РЗЭ (в частности, величины тетрадного эффекта лантаноидов для отдельных тетрад и суммарного тетрадного эффекта, являющихся показателями физико-химических условий fossilization ископаемых биологических материалов). Впервые показана возможность применения индикаторных свойств лантаноидов для реконструкции палеоэкологических условий образования покровных отложений Восточной Сибири.

Индикационные возможности лантаноидов для реконструкции условий седиментогенеза и диагенеза осадков рассмотрены в главе 3.

РЗЭ, благодаря их уникальным химическим свойствам, являются эффективными трассерами и маркерами фундаментальных геохимических процессов. Эти свойства определяются следующим:

(1) РЗЭ (за исключением Се), как правило, трехвалентны и в поверхностных

условиях, таким образом, отличны от ближайших соседей в Периодической таблице (двухвалентного Ва и четырехвалентного Hf);

(2) в результате последовательного заполнения 4f электронной оболочки в ряду РЗЭ, с увеличением атомного номера происходит уменьшение их ионных радиусов (т.е. "лантаноидное сжатие"). Этот эффект является причиной систематических различий в химических свойствах РЗЭ всей серии, которые служат эффективным инструментом при изучении процессов фракционирования РЗЭ в окружающей среде. Се и Eu, обладающие переменными степенями окисления, являются индикаторами редокс-условий среды. В сильно восстановительных условиях и при повышенной температуре (гидротермальные растворы) Eu присутствует как Eu^{2+} .

Геохимическое поведение РЗЭ в магматических и метаморфических системах определяется величиной их ионного заряда и радиуса, как установлено В.Гольдшмидтом (1937). В водной среде, однако, часто наблюдается фракционирование РЗЭ, как выражение тетрадного эффекта.

Д.Ф. Пеппард и соавторы [Peppard et al., 1969, 1970] при изучении экстракции трехвалентных лантанидов и актинидов в системах водных фаз, а также между органической и водной фазами, впервые обнаружили явление тетрадного эффекта лантаноидов, в котором РЗЭ, имеющие на четверть, половину, три четверти, и полностью заполненные 4f оболочки обладают повышенной стабильностью и проявляют аномальное поведение. Тетрадный эффект выражается в нарушении формы спектра нормированных по хондриту содержаний редкоземельных элементов, проявленном в разделении спектра на 4 группы (тетрады), границы между которыми проходят между Nd и Sm, по Gd и между Ho и Er.

Проявления тетрадного эффекта к настоящему времени изучены в многообразных климатических обстановках. Их результаты широко отражены в специальной литературе по миграции редких и рассеянных элементов в речных и морских водах тропического и умеренного климата, грунтовых и почвенных водах, в профиле сиаллитных кор выветривания.

Помимо результатов изучения макро- и микроэлементного состава отложений, в настоящей работе применяется ряд новых критериев оценки составов лантаноидов и особенностей их распределения в четвертичных отложениях и костных остатках, что обосновано предшествующими литолого-стратиграфическими исследованиями, в том числе и проведенными автором. К ним относятся следующие коэффициенты:

1) $\Sigma(\text{РЗЭ}+\text{Y})$ – зависит как от состава размываемых пород, так и от фракционирования лантаноидов в зоне гипергенеза [Балашов, 1976; Шатров, 2007 и др.]. Также оценивается суммарное содержание легких лантаноидов ($\Sigma\text{ЛРЗЭ}$, где ЛРЗЭ - La-Ce-Pr-Nd) средних ($\Sigma\text{СРЗЭ}$, где СРЗЭ - Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho) и тяжелых ($\Sigma\text{ТРЗЭ}$, где ТРЗЭ -Er, Tm, Yb, Lu).

2) $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$, где $\Sigma\text{Ce}:(\text{La-Eu})$, $\Sigma\text{Y}:(\text{Gd-Lu, Y})$ – индикатор климата (менее 2,5 – аридный; 2,5-4,0 – семигумидный-семиаридный, свыше 4 – гумидный). Коэффициент отражает интенсивность процессов выветривания на суше, где при

гумидном литогенезе более интенсивно разрушаются полевые шпаты и акцессорные минералы, содержащие церий, что приводит к увеличению отношения. Результаты исследований автора показали, что величина этого индекса для объектов криолитозоны возрастает, что связано с обогащением тонкой фракции отложений полевыми шпатами и гидрослюдами, а также и преобразованием гидрослюд в результате криогенного выветривания.

3) величина цериевой аномалии, выраженная как $Ce^* = 3Ce_n / (2La_n + Nd_n)$ [Дубинин, 2004] - индикатор окислительно-восстановительных условий осадкообразования (составы редких земель нормируются на состав лантаноидов в NASC [Gromet et al., 1984]).

4) величина европиевой аномалии, $Eu^* = 2Eu_n / (Sm_n + Gd_n)$ [Балашов, 1976] – индикатор поступления глубинного вещества в осадки (гидротермы, восходящие флюидные потоки, вулканиты, базиты, гипербазиты). Среднее для осадочных пород фанерозоя 0,61-0,72 [Балашов, 1985; Тейлор, Мак-Леннан, 1988].

5) отношение ЛРЗЭ/ТРЗЭ, рассчитываемое как $[(La + Pr + Nd)/(Er + Tm + Yb + Lu)]^{обп} / [(La + Pr + Nd)/(Er + Tm + Yb + Lu)]^{NASC}$ [Маслов и др., 2007] - является показателем присутствия вулканокластике, соотношения кислых и основных пород в источниках сноса, а также индикатором карбонатизации: преимущественно ЛРЗЭ изоморфно замещают Са в решетке карбонатных минералов [Kuřera et al, 2009]; отношения La/Sc, Th/Sc, Ce/La, Zr/Hf – показатели доли кислых и основных пород в источниках сноса [Cullers, 2000].

6) отношения La/Yb, La/Sm - индикаторы физико-химических (pH, Eh) и фашиальных условий диагенеза [Reynard, 1999; Trueman, 2006; Шатров, 2007; Иванова, Никольский, 2017, Ivanova et al., 2018] (составы редких земель нормируются на состав лантаноидов в NASC [Gromet et al., 1984]).

7) T_i , где $i=1,3,4$ – величины статистической достоверности тетрадного эффекта [Monecke et al., 2002] лантаноидов для 1, 3 и 4 тетрады (1) и суммарного тетрадного эффекта Т (2); значения соответствующих тетрадных эффектов t_i (3) и суммарного тетрадного эффекта t (4, 5) [Irber, 1999], - показатели физико-химических условий седиментогенеза [Иванова, 2012]. В формулах 1-3 v_1-v_4 – нормированные по NASC содержания редкоземельных элементов в соответствующей тетраде.

$$T_i = \sqrt{\frac{1}{2} * \left(\left(\frac{v_2}{\sqrt[3]{v_1^2} * \sqrt[3]{v_4}} \right) - 1 \right)^2 + \left(\frac{v_3}{\sqrt[3]{v_1} * \sqrt[3]{v_4^2}} \right) - 1 \right)^2} \quad (1)$$

$$T = \sqrt{\frac{1}{2N} \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{v_2}{\sqrt[3]{v_1^2} * \sqrt[3]{v_4}} \right) - 1 \right)^2 + \left(\frac{v_3}{\sqrt[3]{v_1} * \sqrt[3]{v_4^2}} \right) - 1 \right)^2} \quad (2)$$

$$t_i = \sqrt{\frac{v_1 \cdot v_4}{v_2 \cdot v_3}} \quad (3) \quad t = \sqrt{t_1 \cdot t_3} \quad (4) \quad t = \sqrt[3]{t_1 \cdot t_3 \cdot t_4} \quad (5)$$

Статистически достоверным тетрадный эффект считается при величине T_i (Т), большей 0.2. Значения t , меньшие 0.8, маркируют тетрадный эффект W-типа, большие 1.1 – М-типа.

8) отношение Y/No - показатель физико-химических условий диагенеза и фоссилизации [Kawabe et al., 1991; Иванова, 2012].

9) Диаграммы $Nd_N-Gd_N-Yb_N$ позволяют выделять поля, отвечающие определенным обстановкам осадконакопления [Patrick et al., 2004], и информативны для диагностики переотложенных костных остатков.

10) Разработанная автором диаграмма t_1 (тетрадный эффект $La-Ce-Pr-Nd)_N$ - t_3 (тетрадный эффект $Gd-Tb-Dy-No)_N - (La/Sc)_N$ применяется специально для диагностики переотложенных костных остатков, а также высоко информативна для определения климатических и физико-химических условий диагенеза осадков.

Все эти результаты автор сформулировала на основе глубокого анализа истории прикладного изучения геохимии РЗЭ за последние полвека: от первоначальных петрогенетических идентификаций магматических пород по валовым концентрациям РЗЭ до детальных приложений индикаторных возможностей РЗЭ, характеризующих особенности поверхностных, морских и подземных вод, проявления тетрадного эффекта под действием почвенных процессов и в продуктах химического выветривания.

Применительно к объекту исследования диссертации – разнообразным проявлениям полярного покровного комплекса – автором использованы эффекты фракционирования РЗЭ в природных средах криолитозоны, являющиеся мощным палеоэкологическим сигналом, уже установленным во многих природных обстановках. Графически результаты фракционирования отображаются в виде спектра $РЗЭ_N$. Для снятия влияния различной распространенности в природе (правило Оддо-Гаркинса) полученные данные нормируются на состав лантаноидов в NASC [Gromet et al., 1984]. Характер распределения $РЗЭ_N$, фиксируемый на графиках, является уникальной особенностью для различных фациальных разновидностей четвертичных отложений.

Процессы миграции, распределения и фракционирования редких и рассеянных элементов достаточно хорошо изучены в водных средах тропического и умеренного поясов, тогда как поведение микроэлементов в корах выветривания, неконсолидированных отложениях и почвах криолитозоны остается практически неизученным. Изменчивость содержаний РЗЭ в природных водах может быть объяснена (1) составом исходных пород и минералов, обеспечивающим попадание РЗЭ в раствор, (2) сорбцией легких РЗЭ (ЛРЗЭ) оксигидроксидами железа, органическим веществом и поверхностью глинистых частиц, поглощением планктонными организмами, (3) преимущественной способностью тяжелых РЗЭ (ТРЗЭ) образовывать водные комплексы, особенно с карбонат-ионом в щелочных водах, и (4) наличием окислительно-восстановительных реакций, влияющих на распределение Ce и Eu. Фракционирование РЗЭ в водной среде осложняется различной устойчивостью комплексных соединений РЗЭ с различными лигандами (например, H_2O , OH^- , $(CO_3)^{2-}$, $(PO_4)^{3-}$, F^- , Cl^- , OB и т.д.), которая зависит от давления, температуры, рН и Eh. В целом, реки с более высоким рН воды имеют более низкие концентрации РЗЭ в ее составе. С возрастанием рН степень адсорбции РЗЭ на поверхности взвешенных частиц

изменяется следующим образом: легкие РЗЭ > средние РЗЭ > тяжелые РЗЭ. При уменьшении рН РЗЭ десорбируются в том же порядке.

Главным результатом исследований, касающихся поведения РЗЭ в криогенных ландшафтах, является обоснование тесной связи геохимических особенностей вмещающих отложений и гидрохимических режимов водных объектов криолитозоны, обусловленной ограниченным контактом водной среды и осадка. Изучение химического состава различных типов ископаемых льдов и природных вод на о. Новая Сибирь [Иванова, 2012], на местонахождении Улахан-Суллар (Северное Верхоянье, р. Адыча) [Иванова, Никольский, 2007; данные настоящей работы] показало, что воды зоны гипергенеза в островной зоне характеризуются, в основном, слабощелочным (до 8.1) рН, минерализованы (минерализация до 500 мг/л), основные анионы представлены хлоридом, гидрокарбонатом и сульфатом, катионы – магнием, кальцием и натрием. Можно предположить, что в присутствии сильных ионов-комплексообразователей происходит выщелачивание тяжелых и средних РЗЭ из глинистой фракции вмещающих отложений. Накопление легких лантаноидов происходит за счет физической адсорбции.

Воды зоны гипергенеза в континентальной обстановке характеризуются большими вариациями рН (от 5 до 8.4), большей степенью минерализации (до 1000 мг/л), разнообразным катионно-анионным составом. Механизм фракционирования РЗЭ в этих водах будет определяться процессами выщелачивания тяжелых и средних РЗЭ при переменной роли физической адсорбции, степень которой, как было показано выше, зависит от кислотно-щелочных условий среды.

Преимущество использования элементов группы РЗЭ в качестве геохимических индикаторов процессов выветривания, педогенеза и диагенеза обусловлено следующими причинами: равномерное распределение в минералах; единый источник – материнские породы, антропогенное влияние крайне редко; общие для всей группы геохимические особенности и проявление внутригруппового фракционирования, обусловленного различием в константах гидролиза и комплексообразования и различной устойчивостью РЗЭ-несущих минералов в зоне гипергенеза.

Таким образом, на материалах первых трех глав работы получил обоснование ее первый тезис о геохимии РЗЭ в криогенных корах выветривания. В условиях криогенного выветривания при повышении щелочности поровых растворов и их высокой ионной силе фракционирование РЗЭ в глинистой фракции рыхлых отложений проявлено в деплетировании ЛРЗЭ при остаточном накоплении СРЗЭ. Соответственно, можно рассматривать спектры РЗЭ глинистой фракции как индикатор процессов криогенеза в условиях полярного литогенеза. Апробация предложенных критериев на исследованных автором разрезах верхнекайнозойских отложений Восточной Сибири показала, что первое основное положение об индикационных возможностях особенностей распределения РЗЭ можно считать доказанным.

Глава 4. Палеоэкологическая интерпретация распределения лантаноидов в ископаемых костных остатках. Ископаемые костные остатки

(КО) служат не только прямым палеоэкологическим индикатором – свидетелем и участником былой экосистемы, но и источником объективной информации о миграционных процессах, существовавших во вмещающих отложениях. Одной из насущных задач палеоэкологических исследований является последовательное рассмотрение стадий диагенетических изменений рыхлых отложений и содержащихся в них КО, что позволяет учесть влияние этих изменений при палеоклиматических реконструкциях, в частности [Bernat, 1975; Wright et al., 1984; Elderfield and Pagett, 1986; Wright et al., 1987; Trueman, 1999; Reynard et al., 1999; Armstrong et al., 2001; Trueman and Tuross, 2002; Kemp and Trueman, 2003, Trueman et al., 2006, 2008, 2011; Смирнов и др., 2009; Herwartz et al., 2013; и др.].

Костный детрит содержит информацию не только о геохимии среды обитания, но также и о характере и степени изменений костного вещества при диагенезе. Основной минеральной составляющей кости является биоапатит, имеющий биогенное происхождение. По химическому составу он карбонатсодержащий, на что указывают высокие значения как «фосфоритового» ($\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$), так и «апатитового» (Ca/P) модулей.

Компоненты химического состава костей четко подразделяются на две конкурирующие группы. Первая группа ($\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{P}_2\text{O}_5+\text{SO}_3$) – включает компоненты собственно биоапатита, а вторая – ксеноминеральные загрязнения в среде захоронения ($\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MnO}+\text{MgO}+\text{SrO}+\text{K}_2\text{O}$). Содержание последних варьирует до 45 мас. %, убывая от костей к дентину (2.5–24 мас. %) и далее к зубной эмали и бивням (3.5–6 мас. %) [Силаев и др., 2015].

В условиях диагенеза коллаген постепенно распадается, и кристаллы биогенного гидроксилapatита из-за высокого количества дефектов и большой площади поверхности растворяются. Отношение поверхность/объем и сорбционная способность фторгидроксиapatита ископаемой кости значительны. В результате ископаемые кости выступают как ионообменные колонки для микроэлементов в ходе диагенеза [Trueman et al., 2011]. Пространство, первоначально занятое коллагеном в свежих костях и зубах, обычно заполняется аутигенными минералами на ранней стадии диагенеза.

Как геологическое тело, ископаемая кость обладает следующими особенностями: во-первых, «породообразующих» элементов всего три – это Ca, P и C; во-вторых, элементы-примеси попадают туда как «сингенетически», в момент жизни особи, так и «эпигенетически»: в виде микровключений минералов (тонкодисперсных частиц породы) в порах и в виде изоморфных примесей в гидроксилapatите или за счет сорбции оксигидроксидными соединениями железа. Соответственно, наиболее вероятными показателями принадлежности той или иной кости к конкретному стратиграфическому горизонту будет распределение элементов, характеризующих окислительно-восстановительный и сорбционный барьеры.

Полученные автором данные (местонахождения Улахан-Суллар, Соп-Хая (Яна-195), Крестовка, Харабай, Чуйский разрез и др.) свидетельствуют, что это Fe, Mn, Co, Cr, V, Cu, Y, PЗЭ и U. Фоссилизация при равных условиях нарастает соответственно плотности и массивности кости. В общем случае фракционирование PЗЭ при фоссилизации костных остатков проявляется в большем деплетировании легких PЗЭ (рис. 3). Анализ, проведенный с

использованием кларков, рассчитанных В. В. Ковальским (1970) для наземных организмов, показывает, что при фоссилизации концентрация ксенобиотных микроэлементов может превышать первоначальную в тысячи (Li, Ba, Ga, Ge, Zr, Sb) и даже сотни тысяч (U, Y, РЗЭ, Sc, Nb) раз. В этом отношении особенно показательны лантаноиды и уран.

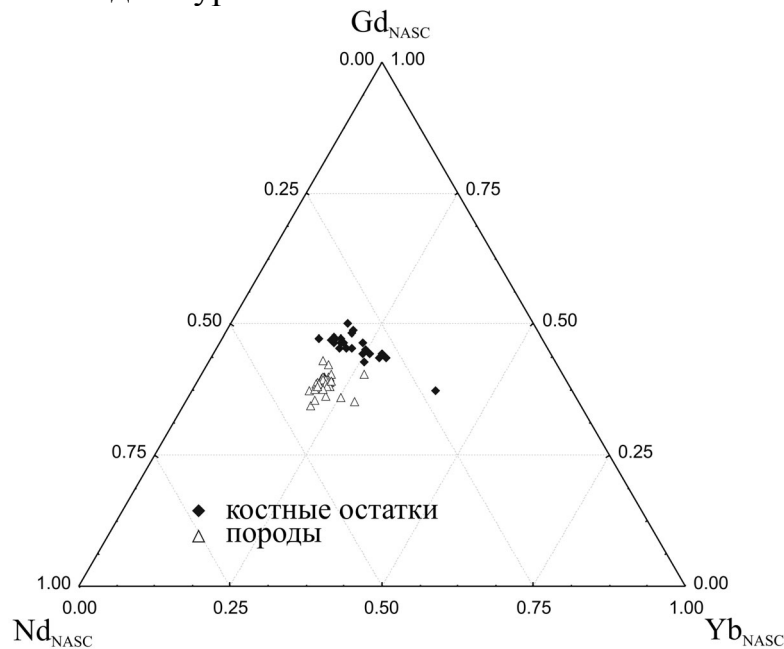


Рис. 3 Фракционирование РЗЭ при фоссилизации костных остатков (р. Крестовка).

Фракционирование РЗЭ в водной среде и в ископаемых костях связано общими закономерностями и контролируется четырьмя главными процессами: (1) выветриванием (растворением минералов); (2) комплексообразованием; (3) сорбцией/десорбцией; и (4) осаждением минералов. В общем случае, константы устойчивости неорганических комплексов РЗЭ более высоки для ТРЗЭ чем для ЛРЗЭ.

Известно, что скорость диагенеза зависит от размера кости, но сведения о прямых наблюдениях практически отсутствуют. Основные доказательства в пользу накопления РЗЭ в ходе раннего диагенеза и последующего поведения ископаемой кости как замкнутой системы, следуют из высокой реакционной способности кристаллов костного апатита, ограниченной пористости фоссилизированной кости, высоких градиентов содержаний U и РЗЭ от поверхности в глубину кости, иллюстрирующие скорость диффузии [Kohn, 2008 и др.], корреляции изотопного состава Nd в зубах ископаемых рыб в различных осадочных бассейнах с изотопным составом Fe-Mn корок [Martin and Scher, 2004 и др.]. Диффузия полностью не прекращается после раннего диагенеза, и поглощение РЗЭ костным материалом может быть продолжительным в различных обстановках седиментогенеза. Костные остатки, фоссилизированные в криогенных условиях, по данным автора [Иванова и др., 2015б], вариаций состава РЗЭ на различных расстояниях от поверхности кости не демонстрируют.

Визуализация спектров РЗЭ в виде тройной диаграммы в координатах Nd_N , Gd_N и Yb_N позволяет сопоставлять особенности фракционирования РЗЭ в различных типах природных вод, тонкой фракции осадочных пород и ископаемых костных остатках (рис.4).

Точки, расположенные близко к Yb_N , обогащены ТРЗЭ, к Nd_N –ЛРЗЭ, к Gd_N – СРЗЭ, в центре треугольника – точки с отсутствием фракционирования. Эта диаграмма должна использоваться совместно с интерпретацией других индикаторных соотношений и Ce - Eu аномалий, чтобы обеспечить детальные сопоставления и корректную палеоэкологическую интерпретацию.

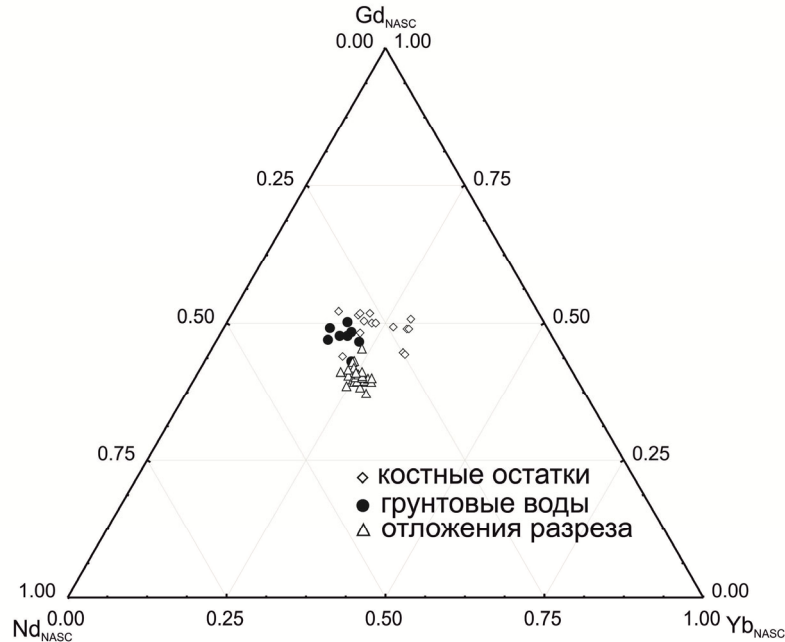


Рис. 4. Тройная диаграмма нормализованных по NASC Yb_N , Gd_N и Nd_N отложений разреза Улахан-Суллар, грунтовых вод и ископаемых костных остатков [данные автора].

Важным показателем, иллюстрирующим различные фациальные обстановки fossilization костных остатков, являются соотношения $(La/Yb)_N$ и $(La/Sm)_N$, что подробно обсуждалось в работе [Touret, 2006]. Содержания РЗЭ в ископаемых костях (1696 образцов) из широкого спектра наземных и морских местонахождений показаны на рис. 5 А. Различия в составе РЗЭ костных остатков, захороненных в различных седиментационных обстановках, отражают различия в характере миграции различных РЗЭ. Применение подобных диаграмм дает возможность выделить группы образцов костных остатков, fossilized в прибрежно-морских и континентальных условиях, но не позволяет определить принадлежность их к конкретным стратиграфическим уровням разрезов (рис. 5 Б).

Вариабельность содержаний РЗЭ и геохимических коэффициентов, отражающих степень фракционирования, в костях значительно выше, чем в породах. В спектрах КО (рис. 4, 6) выделяются образцы, обогащенные средними и тяжелыми РЗЭ. С учетом специфики полярного литогенеза эффект унаследованности спектров РЗЭ проверен нами на многих разрезах квартала Арктической Сибири. Например, для геохимического расчленения разреза Харабай и поиска статистически значимых геохимических различий между осадками и костями разных совокупностей были использованы индикаторные коэффициенты (отношения содержаний отдельных РЗЭ), дискриминантный анализ и классификационные диаграммы, отражающие степень фракционирования РЗЭ при диагенезе костного апатита и осадков [Ivanova et al., 2017].

Использование в качестве исследуемых параметров именно отношений концентраций элементов, принадлежащих к общей аналитической группе, позволяет подавлять флуктуации, связанные с аналитическими погрешностями при проведении многоэлементного анализа.

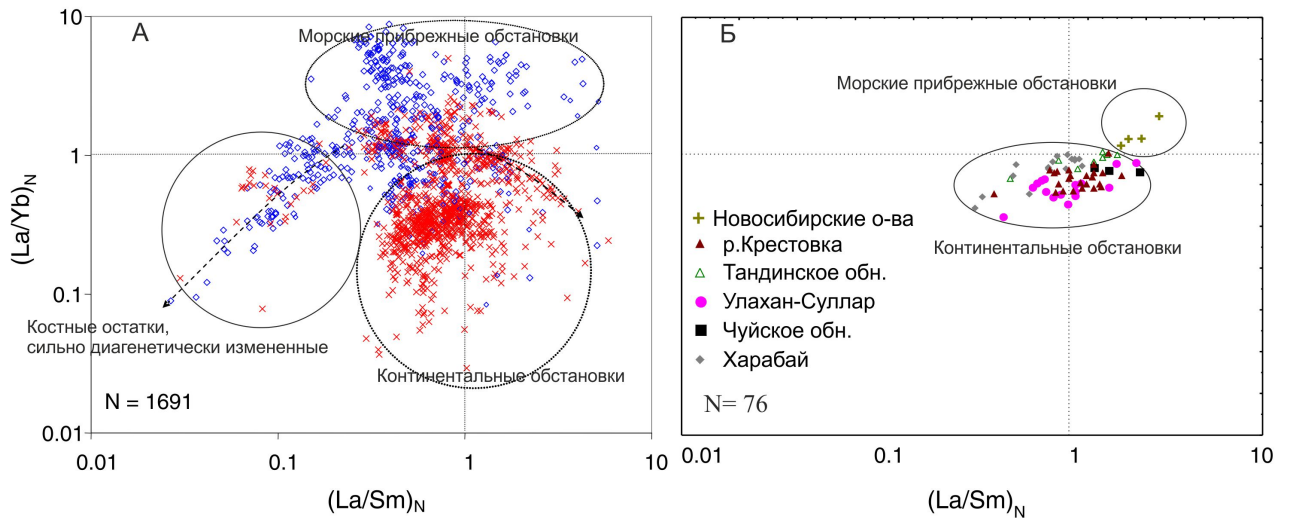


Рис. 5. Диаграмма состава ископаемых костных остатков (силур-плейстоцен) в координатах $(La/Sm)_N$ - $(La/Yb)_N$. **А:** Данные из работ: [Wright et al., 1984; Elderfield and Pagett, 1986; Grandjean and Albare`de, 1989; Grandjean-Lécuyer et al., 1993; Girard and Albare`de, 1996; Samoilov and Benjamini, 1996; Laenen et al., 1997; Trueman and Benton, 1997; Samoilov et al., 2001; Staron et al., 2001; Patrick et al., 2002; Picard et al., 2002; Kemp and Trueman, 2003; Lécuyer et al., 2003; Trueman et al., 2003; Metzger et al., 2004; Patrick et al., 2004; Martin et al., 2005; Trueman et al., 2005, 2006]. **Б** – данные настоящей работы.

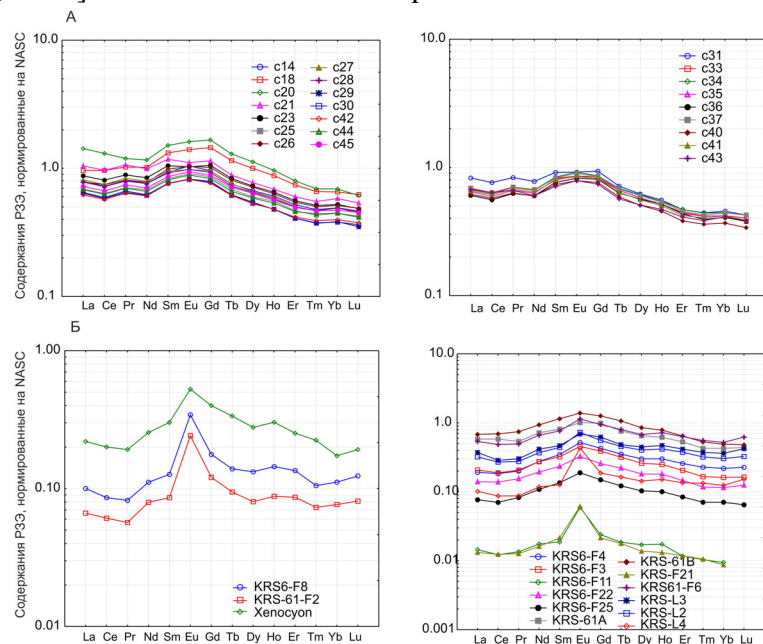


Рис.6. Крестовский разрез. Спектры РЗЭ_N во вмещающих отложениях (А) и в КО (Б).

Основной особенностью спектров РЗЭ_N костных остатков изученных местонахождений является существенное обогащение средними и тяжелыми РЗЭ по сравнению со спектрами РЗЭ вмещающих отложений. Большинство образцов ископаемых костных остатков из различных местонахождений заметно обогащены тяжелыми РЗЭ ($LPZЭ/TPZЭ < 1$) и имеют уровень Y/Но отношения выше первичного (хондритового — 28), что позволяет предположить активную

роль комплексообразования при фракционировании РЗЭ и перенос ионов РЗЭ во флюиде в комплексной, а не в ионной форме.

Однако для некоторых образцов зафиксировано отсутствие корреляции между степенью фракционирования РЗЭ и отношением Y/No (местонахождения Тандинское, Улахан-Суллар), что может быть обусловлено фракционированием РЗЭ вследствие переноса в ионной форме.

Спектры РЗЭ_N в КО из различных горизонтов **отличаются между собой, но подобны спектрам РЗЭ вмещающих осадков**. Это позволяет определять их стратиграфическую принадлежность. Уникальные композиции РЗЭ_N исходных осадков сохраняются в ископаемых костных остатках даже после их переотложения – в этом суть второго основного положения диссертации.

Глава 5. Палеоклиматическая интерпретация распределения геохимических маркеров в отложениях опорных разрезов плейстоцена Восточной Сибири. Имеющиеся в распоряжении автора массивы данных о составе и строении покровных отложений Восточной Сибири, свидетельствуют о слабой изменчивости палеоэкологических индикаторов, обсуждаемых в главах 2 и 3. Показано, что по направлению геохимического трансекта (архипелаг Де-Лонга - оз. Байкал) эти индикаторы в сопоставлении с биостратиграфическими данными индицируют преимущественное существование в этой части криолитозоны в плейстоцене и голоцене открытых ландшафтов. Детализация палеоэкологических условий формирования разрезов выполнена с помощью ряда специфических геохимических индексов.

В зависимости от геологической истории развития территории в опорных разрезах представлены отложения разных этапов квартера. В связи с этим особое внимание обращалось на хронологическую привязку материала.

5.1. Идентификация палеоклиматических событий и их трендов в островной структурно-фациальной зоне. Указанная идентификация выполнена по опорным разрезам четвертичных отложений и льдам основного обнажения бухты Мира (о. Новая Сибирь), береговых обрывов о. Фаддеевский, толще аласных отложений о. Новая Сибирь и лагунных отложений о. Жохова.

Сводная выборка проб четвертичных отложений была обработана методом факторного анализа в модели главных компонент (рис. 7). Выделено три ведущих фактора, объясняющие 85% изменчивости системы. Первый фактор (42%) характеризует степень влияния состава коренных пород и сорбционные их свойства (фациальную принадлежность). Второй фактор в большей степени связан с изменением климатических условий. Третий отражает изменения палеосолености и типа режима осадконакопления в процессе седиментогенеза.

Спектры РЗЭ_N в отложениях опорных разрезов островной фациальной зоны пологие (ЛРЗЭ/ТРЗЭ варьируют в пределах 1.53-2.34) и характеризуются слабо выраженными Ce* и Eu* аномалиями, 0.57-0.96 и 0.61-1.32, соответственно. Отличительная черта отложений островов – резко повышенные по отношению к NASC содержания Sm. Содержания ΣРЗЭ и иттрия максимальны для глин о.Новая Сибирь и о.Фаддеевский; для лагунных и аласных отложений они значительно ниже, закономерно отражая положительную корреляционную связь между величиной содержания ΣРЗЭ и количеством глинистой фракции.

Полученное для разрезов соотношение $La_N/Yb_N - La_N/Sm_N$ показано на

диаграмме (рис. 8), где обособлены поля морских глин канарчакской свиты, лагунных отложений и аласных суглинков.



Структура ведущих факторов выборки четвертичных отложений островной зоны

	I	II	III
Al	0.93	0.28	0.09
Ba	0.38	0.42	-0.71
Ca	-0.17	0.49	0.38
Co	0.76	0.21	0.45
Cr	0.83	0.26	0.42
Si	0.33	0.89	0.22
Fe	0.73	0.36	0.50
Mg	0.31	0.30	0.87
Mn	0.77	-0.07	0.29
Ni	0.26	0.24	0.41
Sr	-0.14	0.44	0.92
Ti	0.29	0.32	0.79
V	0.76	-0.56	0.20
Zn	0.92	0.02	0.26
K	0.41	0.83	0.28
P	0.19	-0.94	0.08
Rb	0.84	0.37	-0.12
Zr	0.80	-0.20	0.01
Y	0.86	0.36	0.07
Pb	0.92	0.07	-0.12
% изменч.	42%	24%	19%

Рис. 7. Структура геохимического поля отложений островной фациальной зоны в координатах двух главных факторов изменчивости.

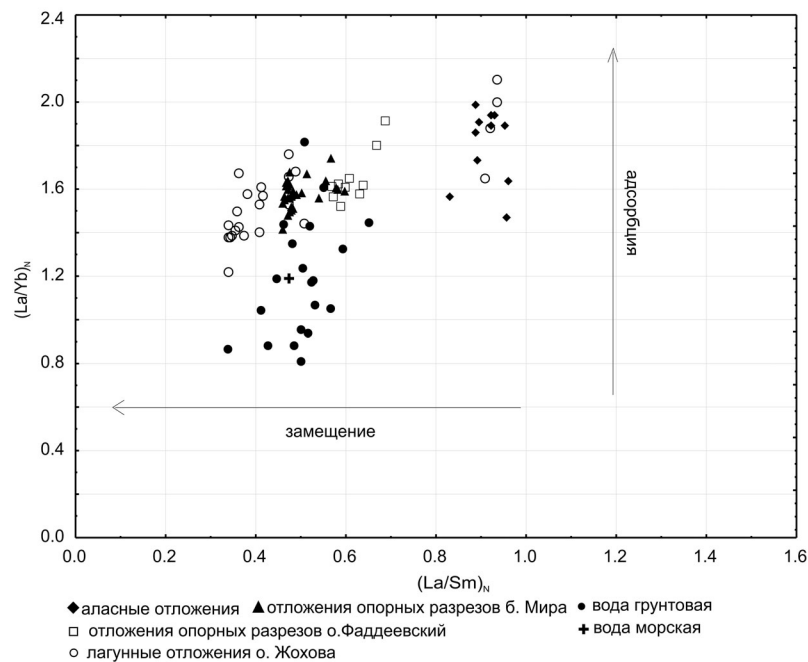


Рис. 8. Диаграмма $La_N/Yb_N - La_N/Sm_N$

Сопоставление отношений La_N/Yb_N и La_N/Sm_N для вод деятельного слоя (о. Новая Сибирь, Фаддеевский) и для отложений изученных на этих островах

разрезов позволяет сделать следующие выводы: (1) заметное фракционирование наблюдается для СРЗЭ и ТРЗЭ; (2) фракционирование средних РЗЭ максимально проявлено в отложениях аласа; (3) фракционирование РЗЭ в изученных отложениях обусловлено процессами ионного обмена с глинистыми минералами при переменной роли сорбции; (4) воды зоны гипергенеза обогащены ТРЗЭ, которые интенсивно выщелачиваются из осадка, в присутствии сильных комплексообразователей (Cl^- , HCO_3^-) образуют устойчивые комплексные соединения. Повышенные значения La_N/Sm_N для лагунных отложений о.Жохова (нижняя часть колонки, интервал 100-132 см) могут быть объяснены присутствием большого количества аутигенных минералов, в которых ЛРЗЭ изоморфно замещают катионы щелочноземельных металлов.

Значения остальных коэффициентов, отражающих фракционирование средних и тяжелых РЗЭ ($(\text{Yb}/\text{Sm})_N$, $(\text{Y}/\text{Sm})_N$), максимально варьируют в лагунных отложениях, но мало вариабельны в других выборках и в общей выборке пород островной зоны.

Результаты исследований состава комплекса лекорастворимых солей и поглощенного комплекса глин Новосибирских островов показали, что для ряда элементов доля подвижной формы может достигать до 30%. Ряды геохимической подвижности для каждой из зон седиментации глинистых отложений близки и различаются, в основном, по положению Ba, В, Sr и Mn.

Рисунок 9 характеризует тетрадные эффекты и их статистическую достоверность для различных фациальных разновидностей отложений островной зоны. Большинство образцов прибрежно-морских отложений канарчакской свиты обладает значимым тетрадным эффектом М-типа. Лагунные отложения по величине t_3 занимают промежуточное положение, проявляя эффект и М, и W-типа для третьей тетрады.

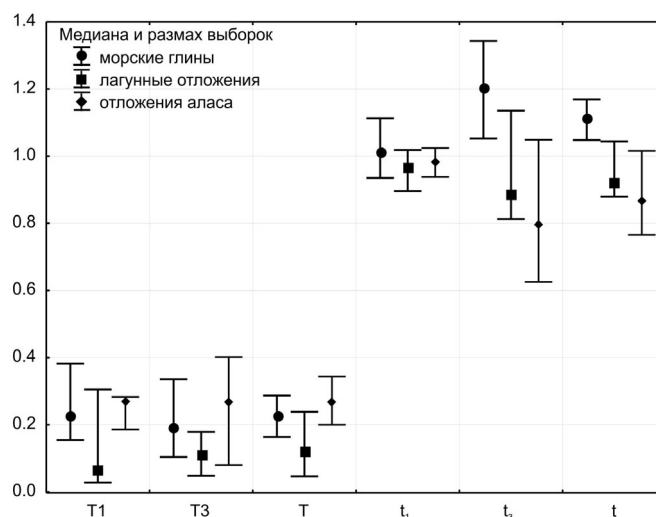


Рис. 9. Размах значений тетрадных эффектов (t_i) и показателей их статистической достоверности (T_i) для различных фациальных разновидностей покровных отложений островной зоны: охарактеризована первая (1), третья (3) тетрады и суммарный тетрадный эффект. Объем выборок: морские глины- 51 обр.; лагунные отл.-25 обр.; алас -11 обр.

В отложениях аласа величина тетрадного эффекта при сохранении уровня значимости уменьшается до перехода в случае третьей тетрады к W-типу. Таким образом, установлено, что распределение значений тетрадного эффекта, во-

первых, отражает изменение природных условий на границе плейстоцен-голоцен, во-вторых, изменение фациальных условий образования пород.

Образование залежей пластовых льдов на о. Новая Сибирь шло в окислительных условиях промерзающих водонасыщенных толщ, о чем свидетельствует отрицательная Eu^* -аномалия. Верхние горизонты пластовых льдов имеют по характеру распределения РЗЭ внутригрунтовое происхождение.

Диапазон изменений коэффициентов, отражающих фракционирование средних и тяжелых РЗЭ: $(Yb/Sm)_N$, Y/Sm , $(Nd/Yb)_N$, $(Gd/Yb)_N$ как по отдельным разрезам, так и по общим выборкам пород островной зоны, может служить характерной особенностью систематики РЗЭ отложений обстановок периконтинентального осадконакопления в данном регионе.

Интерпретация геохимических данных позволила провести реконструкцию физико-химических условий седиментогенеза в островной фациальной зоне, где на изменение параметров окружающей среды влияют процессы, управляющие режимом кислорода: окисление восстановленных форм элементов в разрушающихся мерзлых породах; разложение органического вещества; образование баров, формирующих аноксидную обстановку в прибрежной зоне.

К югу островная зона смыкается с приморской Яно-Индибирской низменностью, где изменения полярного покровного комплекса протекали в пологой пришельфовой зоне взаимодействия океана и континента. Здесь развиты исключительно континентальные четвертичные толщи, среди которых преобладают аллювиальные и аллювиально-озерные генетические типы отложений.

5.2. Идентификация палеоклиматических событий и их трендов с помощью предложенных геохимических маркеров на территории Яно-Индибирской низменности (местонахождение Соп-Хая (Яна-195)).

Разрезы всех уровней комплекса низких террас местонахождения Яна-195 представлены многолетнемерзлыми породами с высокой льдистостью и содержат ПЖЛ, т.е. принадлежат ледовому комплексу. Вверх по разрезу грубые конгломераты-галечники и косослоистые пески руслового аллювия сменяются пойменными песчаными алевритами с криотурбациями, выше залегает пачка покровных тонких алевритов с оторфованными горизонтами. Время формирования всей толщи охватывает интервал от позднего эоплейстоцена до середины позднего неоплейстоцена [Басилян и др., 2015]. На основании большой серии радиоуглеродных датировок [Питулько, Павлова, 2010; Basilyan et al., 2011], врезание и начало формирования аллювия второй речной террасы, вмещающего культурный слой Янской палеолитической стоянки, произошло около 40 т.л.н. Возраст культурного слоя определяется в интервале 28500-28700 л.н. серийными ^{14}C датами [Питулько и др., 2012].

Максимальной вариабельностью в составе отложений, вмещающих культурный слой стоянки, обладают Ni , P , Ca , Co , As , Mo . Анализ распределения по выборкам главных петрохимических модулей (ГМ, ФМ, ЖМ, ТМ, НМ, ЦМ, НКМ, АМ) и петрохимических индексов (CIA , CIW , ICV , PIA) свидетельствует о слабом выветривании при формировании отложений и слабом проявлении антропогенного влияния (рис.10). Характер спорово-пыльцевых спектров отложений третьей террасы [Басилян и др., 2015] указывает на холодные и

засушливые условия во время формирования разреза. В нижних аллювиальных циклах имеются значительные перерывы в осадконакоплении и следы интенсивных размывов.

Наоборот, пойменные и субэральные отложения представлены наиболее полно и содержат информацию об изменениях климата на изучаемой территории.

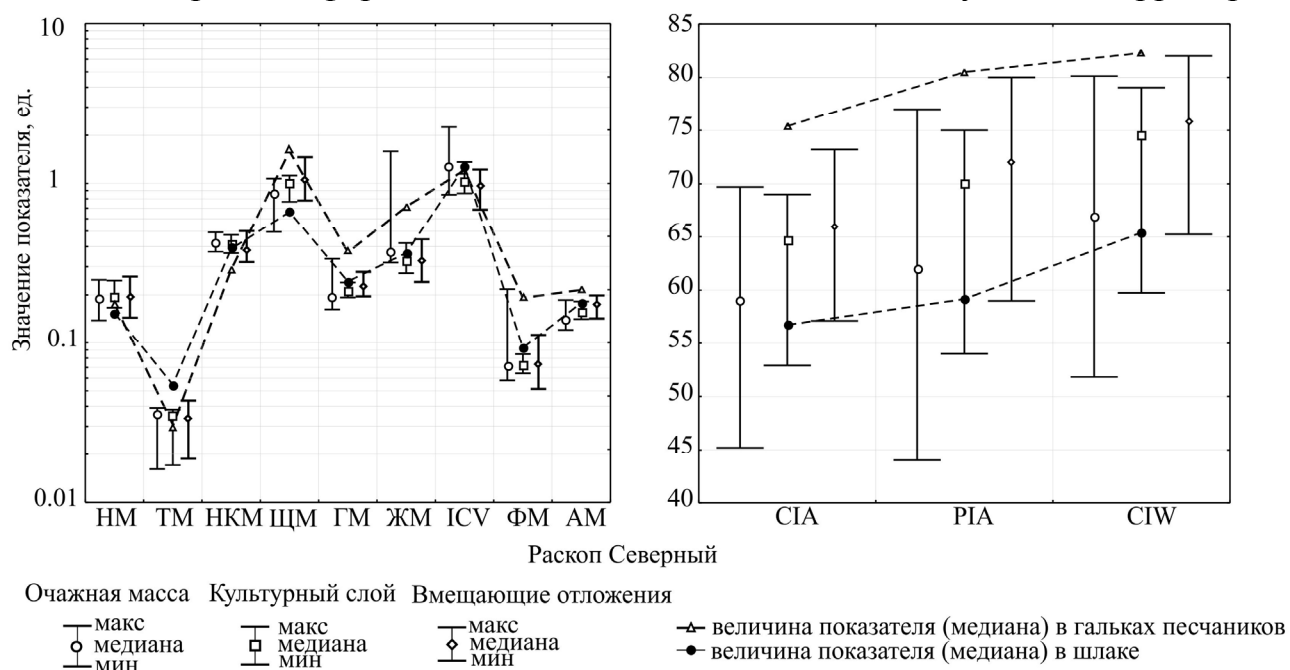


Рис. 10. Медианные значения и размахы выборок петрохимических модулей и индексов по отложениям Северного раскопа (Яна-195). Объем выборок: вмещающие отл.-31 обр.; очажная масса-13 обр.; культ.слой- 10 обр. Масштаб оси Y на левом графике – логарифмический.

Петрохимический анализ (рис.11) подтверждает выводы исследователей Янской стоянки [Басилян и др., 2015] и позволяет уточнить оценку палеоклиматических условий некоторых споро-пыльцевых зон. В частности, при формировании слоя С6 (СПЗ-5) по всем геохимическим параметрам реконструируются периоды похолодания и потепления. Изменение показателей определяется суммарным влиянием климата, гидродинамики и криогенного выветривания. Для более четкого выделения палеоэкологического сигнала использованы индикаторные свойства РЗЭ. Спектры РЗЭ_N пологие (ЛРЗЭ/ТРЗЭ в среднем 1.5) и характеризуются слабо выраженными цериевой и европиевой аномалиями (0.97-1.10 и 0.93-1.32, соответственно). Во всех образцах отложений третьей террасы проявлен значимый тетрадный эффект W-типа. Его появление, видимо, обусловлено большей дисперсностью осадка (гидродинамический режим водотока на этом участке реки во время седиментации был более спокойным, преобладали пойменные и старичные фации, представленные глинистыми алевритами) и широким развитием процесса торфообразования и биоредукции, с циклическим изменением окислительных и восстановительных условий при периодическом затоплении береговой зоны.

Стратификация разреза второй надпойменной террасы по распределению тетрадных эффектов, цериевой аномалии, $\sum Ce/\sum Y$ и других геохимических коэффициентов показывает, что весь разрез сформирован в холодных условиях (рис.12). Резкое изменение физико-химических условий фиксируется в палеопочвенных горизонтах.

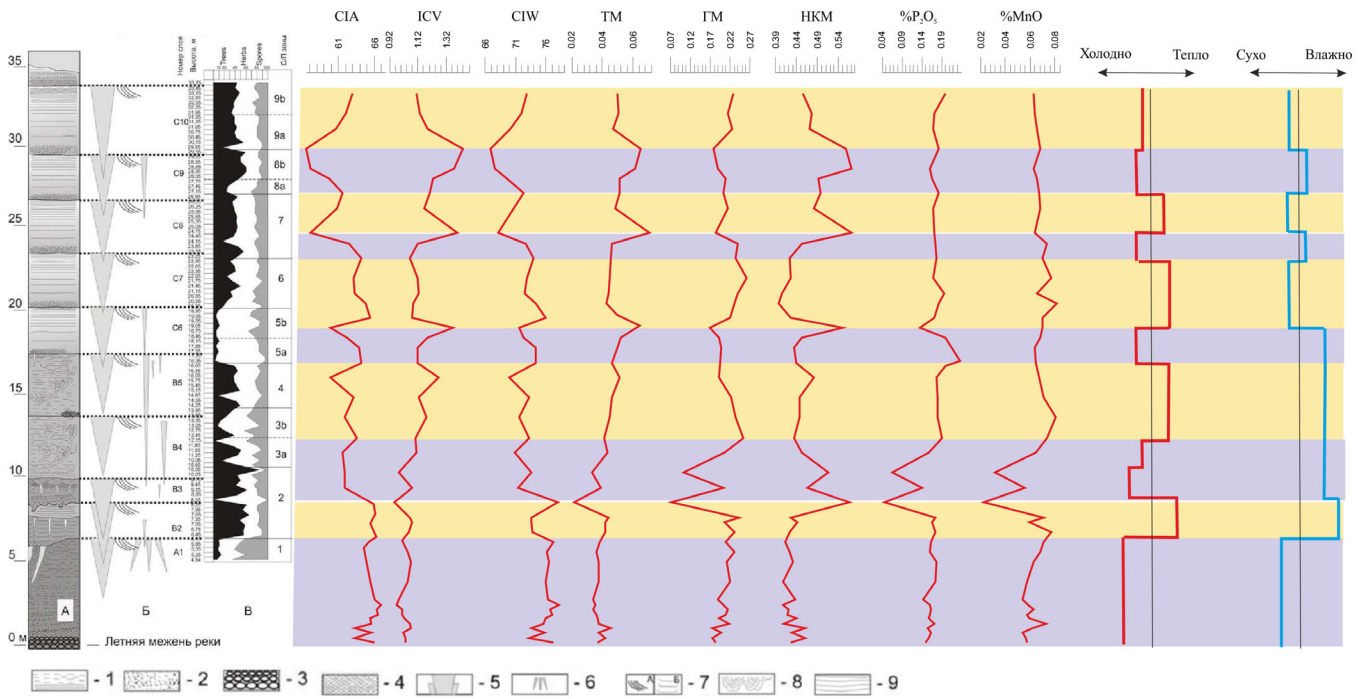


Рис. 11. Распределение оксидов (P_2O_5 , MnO), основных петрохимических модулей и индексов на опорном разрезе 3-ей надпойменной террасы Яна-195, схема разреза и споро-пыльцевая диаграмма (левая часть рисунка) приведена по [Басилян, Анисимов, Павлова и др., 2015]. 1 – алевриты и лессовидные суглинки, 2 – песок, 3 – галечные конгломераты, 4 – торф, 5 – повторно-жильные льды (ПЖЛ), 6 – апофизы ПЖЛ, 7 – несогласно залегающие (А) и ненарушенные (Б) поясковые текстуры, 8 – криотурбации, 9 – шлировая текстура. Оранжевой и голубой линиями показано гипотетическое изменение температуры и влажности, реконструированное по комплексу геохимических данных для среды осадконакопления.

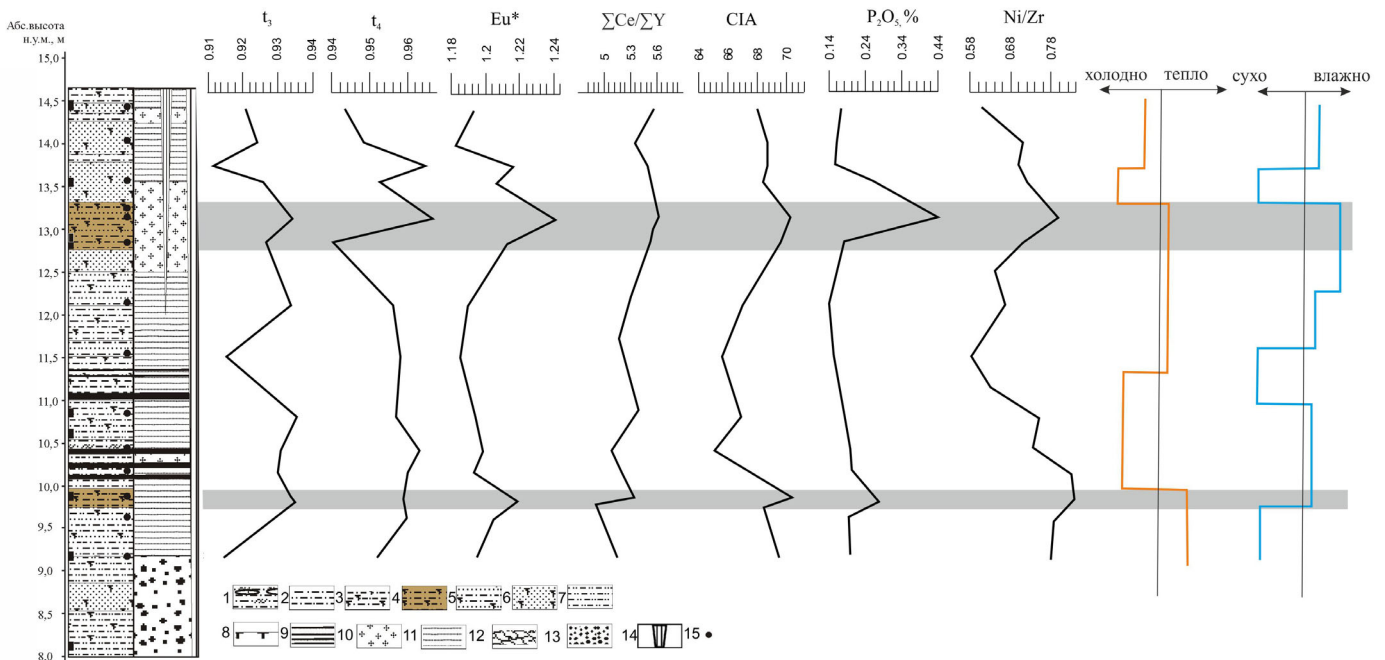


Рис. 12. Изменение тетрадных эффектов и геохимических коэффициентов по профилю второй надпойменной террасы (Яна-195), горизонты палеопочв выделены заливкой. Условные обозначения: Литология: 1-тяжелый комковатый песчаный алеврит; 2-высокольдистый алеврит; 3- алеврит с перемытым растит.детритом; 4- почвенный горизонт с множеством травянистых корешков; 5- песчаный алеврит; 6- тонкозернистый песок с остатками растений; 7- алеврит с тонкозернистым песком. Криотекстура: 8 – граница сезонно-талого слоя; 9- поясковая, толсто-шлировая; 10- массивная; 11- микрослоисто-микрошлировая; 12- среднесетчато-тонкошлировая; 13 –повторно-жильный лед; 14-повторно-жильный лед; 15-точки пробоотбора.

В холодных условиях при наличии сезонно-талого слоя Ni, Cu, Co, Cr, Zn, Sr выносятся из пород более интенсивно, чем в таежных ландшафтах, поэтому понижение значений коэффициентов маркирует периоды похолодания, и наоборот. Фракционирование тяжелых РЗЭ проявлено незначительно, степень его закономерно связана с ростом pH и с повышением содержаний анионов в грунтовых водах. В почвах выражена положительная аномалия Eu. Уменьшение $\sum Ce/\sum Y$ может служить показателем аридизации климата.

Приведенные выше примеры показывают, что использование геохимических методов для отложений, имеющих четкую геоморфологическую привязку, позволяет успешно реконструировать изменение палеоклимата и тем самым переходить к региональным палеогеографическим построениям.

5.3. Северное Верхоянье (разрез Улахан-Суллар, р. Адыча). Палеоэкологические реконструкции аллювиальных равнин Северного Верхоянья выполнены на примере разреза Улахан-Суллар. Разрез исследовался в 1968-2004 гг. [Гончаров, Титков, 1968; Томская, Саввинова, 1971; Котов, 1974; Каплина и др., 1983; Шер, 1984; Минюк, 2004]. В результате этих работ были получены представления о возрасте отложений разреза и о палеогеографических условиях их накопления. Совокупность полученных фаунистических материалов по Улахан-Суллару позволяет считать, что в разрезе 65-метровой террасы присутствуют отложения весьма широкого возрастного диапазона — от позднего плиоцена до позднего плейстоцена.

Палеогеографические условия эпохи накопления видимой части разреза Улахан-Суллар, реконструированные по макроостаткам флоры и палинологическим данным, свидетельствуют о широком распространении, а вероятно, и преобладании открытых ландшафтов с господством травяных группировок лугового, степного, возможно, тундрового типа.

С 2004 по 2007 гг. из этого разреза был получен обширный новый материал, в том числе несколько сотен костей крупных млекопитающих, впервые проведено детальное геохимическое опробование, что позволило существенно уточнить представления о палеоэкологических условиях, стратиграфии и возрасте местонахождения. Изучены четвертичные отложения, ископаемые льды (ПЖЛ, пластовые льды), поверхностные воды и ископаемые костные остатки. Возраст слоев разреза определен биостратиграфическими, ЭПР, радиоизотопными и палеомагнитными данными. Все слои разреза имеют нормальную намагниченность (палеомагнитная эпоха Брюнес).

Используя различия элементов по подвижности в криогенных условиях и изучая распределения отношений геохимических пар (активные, подвижные — к слабоподвижным и инертным), характеризующих интенсивность процессов криогенного выветривания, можно получить представление о палеоэкологических условиях. Пониженные значения таких коэффициентов свидетельствуют о развитии процессов криогенного выветривания (то есть о наличии похолодания), например, на рис. 13 установлено два холодных цикла (верхняя часть разреза) и несколько теплых. Локальные изменения климата фиксируются для горизонта 22-24 м.

Верхняя толща отличается монотонностью фациального состава (пески

хорошей сортировки, до 95% представлено фракцией $< 0,2$ мм), очень низким содержанием тяжелой подфракции, повышенным содержанием литофильных элементов, низким содержанием сидерофилов и халькофилов, слабой интенсивностью процессов выветривания.



Рис. 13. Изменение палеоклиматических геохимических коэффициентов Mg/Zr и Ca/P в терригенном материале. Разрез Улахан-Суллар. 1-гравелиты с песчаным заполнителем; 2-пески мелкозернистые; 3-переслаивание алевритов и песков; 4-прослойки торфа; 5- суглинок; 6-древесные макроостатки; 7-ледяные жилы; 8-псевдоморфозы по ледяным жилам.

Корреляционный и кластерный анализы позволяют выделить две антагонистические геохимические ассоциации, связанные между собой отрицательно: 1) $Al, Ba, Ca, K, Mg, Na, Sr, Rb$ и 2) $Fe, Mn, Ni, Ti, Zn, P, Sc, V, Cr, Co, Cu, Y, Zr, Mo, Sn, Pb$. Первая из них отражает минеральный состав четвертичных отложений (плагноклаз, калиевый полевой шпат, мусковит). Вторая – фаціальную принадлежность пород и изменение физико-химических условий диагенеза.

Сопоставление данных палинологического анализа [Каплина и др., 1983] и распределения по разрезу некоторых окислов, титанового и гидролизатного модулей и индексов интенсивности выветривания показывает, что наиболее резкие изменения климата наблюдаются при формировании отложений нижних (1-3) слоев разреза. Локальные изменения климата фиксируются для горизонта 22-24 м (слой 4, палинокомплекс 4) – потепление, когда локально росли ПЖЛ на низкой пойме, и для горизонта 36 м – похолодание, отметившее смену пойменных осадков эоловыми.

Состав пластовых льдов определяется суммой $Na+K$ и Ca , состав ПЖЛ и ледогрунтовых льдов – Ca и Mg . Судя по морфологии таких тел, это - снежники. Содержания макро- и микроэлементов ниже в подстилающих пачках песков, чем в перекрывающих, что является следствием «отставания» растворенных солей от

мигрирующей к фронту промерзания влаги. Увеличение содержаний элементов на контакте с ПЖЛ является следствием криогенного изменения химического состава пород за счет опреснения льда при промерзании и отжимании солей, за счет создания более окислительных условий при удалении растворенного кислорода во время образования льда.

Спектры $PЗЭ_N$ в отложениях разреза пологие, так же, как и в отложениях разрезов Яна-195 ($ЛРЗЭ/ТРЗЭ$ варьирует в пределах 1.36 – 1.98, составляя в среднем 1.6), и характеризуются слабо выраженными цериевой и европиевой аномалией, величина которых варьирует от 0.93 - 1.06 и от 0.90 - 1.21, соответственно (рис.14). Значения других геохимических коэффициентов в обоих разрезах также подобны, что подчеркивает однотипность их фациального состава.

Исключение составляют параметры, характеризующие тетрадный эффект. Из 28 проб отложений разреза Улахан-Суллар лишь три характеризуются статистически значимыми тетрадными эффектами для третьей тетрады (образцы алевритов и песков из второго слоя обнаруживают значимый М-эффект, а образец песка в основании слоя 4 обнаруживает значимый тетрадный эффект W-типа).

Распределение геохимических коэффициентов по профилю показывает, что наиболее резкие изменения характерны для нижних горизонтов разреза, а, начиная с горизонтов 10-12 м, вариации коэффициентов снижаются, что свидетельствует о смене условий осадконакопления.

Анализ стратификации разреза отложений Улахан-Суллара по распределению величин тетрадного эффекта для третьей тетрады, $\Sigma Ce/\Sigma Y$ и ряда других геохимических коэффициентов позволяет заключить, что наиболее резкое потепление происходило при формировании слоев 1 и 2, а слоям 3 и 4 соответствовали более холодные ритмы. Таким образом, расширены и уточнены представления о палеоклиматических условиях формирования разреза [Каплина, 1983].

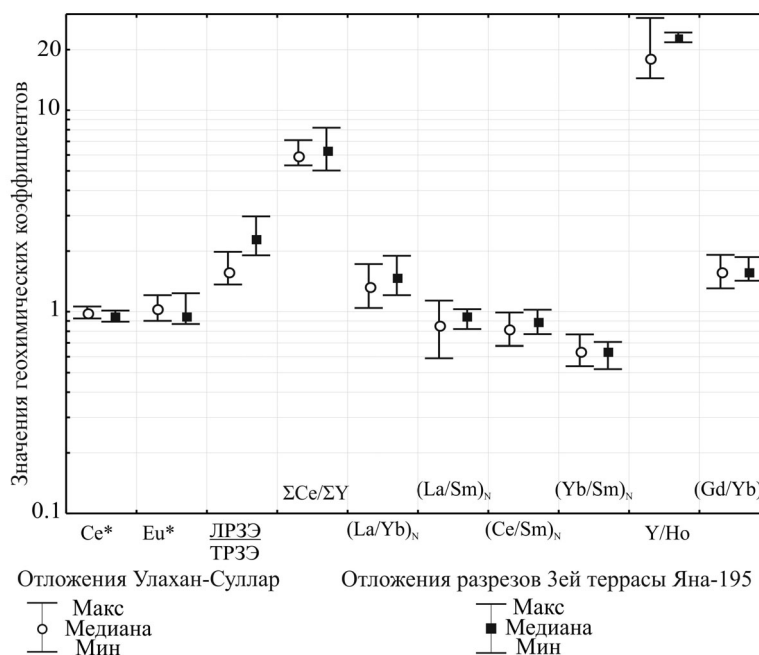


Рис. 14. Вариации геохимических коэффициентов для отложений Улахан-Суллар (28 проб) и третьей террасы местонахождения Яна-195 (55 проб). Шкала вертикальной оси логарифмическая.

5.4. Колымская низменность. Палеоклиматические реконструкции на территории Колымской низменности выполнены нами по разрезам аллювиальных отложений р. Крестовки и Малого Анюя.

На Крестовском разрезе по палеоботаническим и палеонтологическим данным снизу вверх выделены: плиоценовые галечники бегуновской свиты; гелазские слои «кутуях»; отложения олерской свиты (отвечающие верхней части нижнего и нижней части среднего плейстоцена), перекрытые средне-верхнеплейстоценовыми песками [Шер и др., 1977]. Олёрская свита расчленена на нижнюю и верхнюю подсвиты, представлена алевритами, тонкозернистыми песками с прослоями торфа и гравия. Инверсия геомагнитного поля (Матуяма-Брюнес) проходит в самых верхах нижней подсвиты олерской свиты [Минюк, 2006].

Распределение по разрезу некоторых петрохимических модулей, индексов интенсивности выветривания (рис. 15) дополняет палинологические данные [Шер и др., 1977] и позволяет утверждать, что осадконакопление происходило в холодных климатических условиях, начиная с конца верхнего плиоцена. Резкое изменение показателей на границе верхнего и нижнего олера маркирует начало эпохи Брюнес. Распределение геохимических коэффициентов, отражающих особенности фракционирования РЗЭ в разрезе (рис. 15), указывает на постепенное развитие похолодания во время накопления слоев «кутуях» и циклические изменения климата во время накопления олёрской свиты.

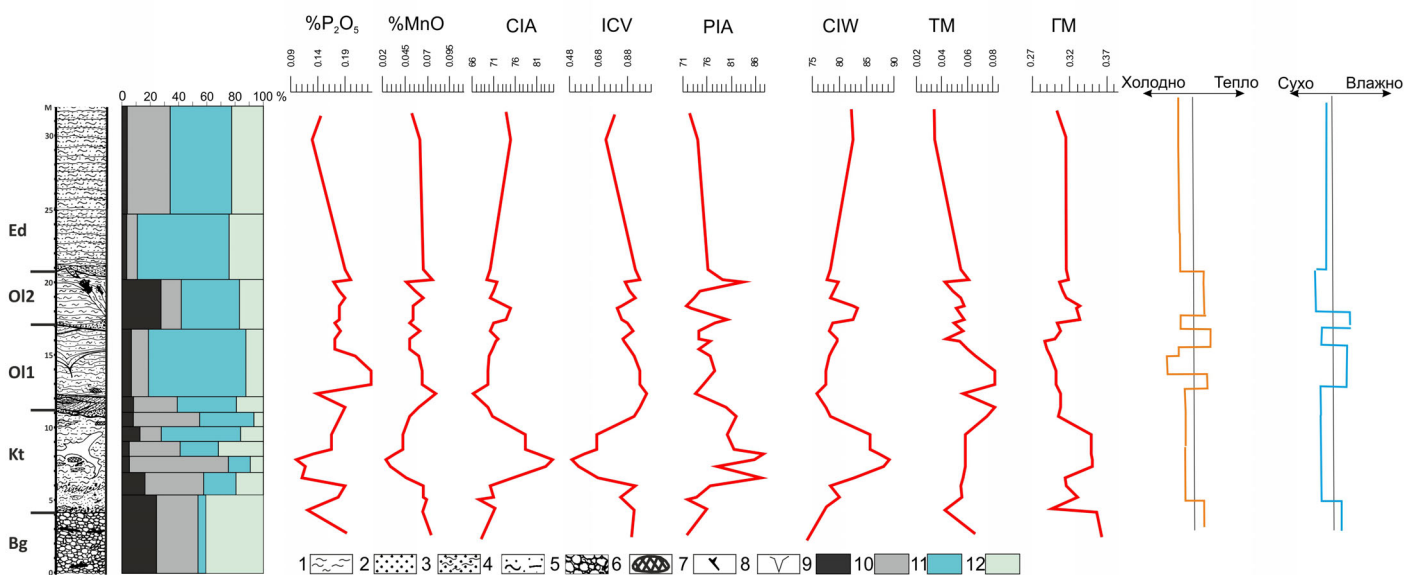


Рис. 15. Изменение по разрезу петрохимических модулей, индексов интенсивности выветривания, геохимических коэффициентов, отражающих особенности фракционирования РЗЭ, и результаты палинологического анализа [Шер и др., 1977]. Оранжевой и голубой линиями показано гипотетическое изменение температуры и влажности, реконструированное по комплексу геохимических данных для среды осадконакопления.

Условные обозначения: 1- алеврит; 2- песок; 3- опесчаненный алеврит; 4 – песчано-глинистый алеврит; 5 –галечник; 6- линзы торфа; 7 – остатки древесины; 8- псевдоморфозы по ледяным жилам; 9-пыльца древесных; 10-пыльца кустарников; 11-пыльца травянистых растений; 12-споры. Горизонт 1: Bg – бегуновская свита; Горизонт II: Kt – слои «кутуях»; Горизонт III: Ol1- нижний олёр; Ol2- верхний олёр; Горизонт IV: Ed –едома.

Максимальное фракционирование средних и тяжелых РЗЭ фиксируется в

зоне перемыва на границе олёра и слоев «кутуях».

Разрез послужил основным объектом изучения тетрадного эффекта фракционирования лантаноидов в фаунистических остатках как критерия их биостратиграфической привязки [Иванова, Никольский, 2015]. Низкая вариабельность параметров в породах связана с наличием в выборке большого количества образцов из псевдоморфоз и грунтовых жил (перемешивание материала). Значимыми (вносящими максимальный вклад в достоверность разделения образцов), являются t_1 , t_3 , U/Th, Y/No ($p < 0.05$). Процент корректности разделения высок, 98% (дискриминантный анализ).

Местонахождение в низовьях р. Малый Анюй изучалось в 2009 и 2013 гг. Разрез подразделяется на две основные толщи – пойменных тонкослоистых тонкозернистых песков и алевритов мощностью до 18 м (толща 1), в которые вложены мощные псевдоморфозы по повторно-жильным льдам, выполненные тонкозернистыми песками и алевритами, в свою очередь, перекрытыми тонкослоистыми озерными осадками с линзами торфа (толща 2). В верхней части толщи 1 обнаружен прослой серо-белой тонкозернистой (дистальной) тефры мощностью до 18 см.

Анализ распределения основных петрохимических модулей и индексов выборки проб отложений разреза, трендов силикатного и плагиоклазового выветривания, геохимических коэффициентов, отражающих особенности фракционирования РЗЭ, показывает, что изученные отложения за счет присутствия вулканокластики отличаются от отложений других местонахождений по ряду характеристик. Так, по сравнению с составом РЗЭ отложений всех изученных местонахождений, отложения разреза по сумме различных групп РЗЭ обладают самыми высокими содержаниями, особенно заметно обогащение тяжелыми РЗЭ, сумма которых варьирует от 6 до 9 мг/кг.

Распределение геохимических коэффициентов указывает на постепенное развитие похолодания во время накопления низов толщи 1 и потепления (интервал, охарактеризованный пробами х6-х8, толща 2). Вариации показателей V/Cr, V/(V+Ni), Ni/Co, Mo/Mn свидетельствуют о преобладании окислительных условий осадконакопления.

5.5. Аллювиальные равнины бассейна реки Лены. Палеоклиматические реконструкции аллювиальных равнин бассейна реки Лены представлены местонахождением Харабай и разрезами нижнего течения Алдана. Стратиграфия разреза Харабай описана рядом исследователей [Алексеев и др., 1961, 1978]. В целом здесь четвертичные отложения представлены аллювиальными и озерно-аллювиальными толщами, перекрытыми сильно льдистыми покровными отложениями, которые слагают высокую надпойменную террасу р. Вилюй. Возраст слоев разреза по палеонтологическим (подъемный материал) и палеоботаническим данным определен как нижне-верхнеоплейстоценовый. Палеогеографические условия эпохи формирования разреза, реконструированные по макроостаткам флоры и палинологическим данным, свидетельствуют о возрастании степени континентальности климата во время накопления отложений. Для поиска статистически значимых геохимических различий между горизонтами осадков разреза Харабай были использованы (рис. 16) отношения

содержаний отдельных РЗЭ, дискриминантный анализ и классификационные диаграммы, отражающие степень фракционирования РЗЭ в процессе диагенеза изучаемых осадков [Ivanova et al., 2017].

Отмечается избыток легких лантаноидов при дефиците тяжелых (ЛРЗЭ/ТРЗЭ варьирует от 1.4 до 2.3), что, видимо, обусловлено преобладанием аллювиальных отложений. Установлено отсутствие цериевой аномалии, наличие положительной европиевой аномалии, выраженного тетрадного эффекта W-типа для первой и третьей тетрады.

Дискриминантный анализ выборки пород четвертичных отложений показал, что значимыми ($p < 0.05$), вносящими максимальный вклад в достоверность разделения образцов, являются тетрадный эффект t_1 и t_3 а также отношения La/Sc , U/Th . Построенная на основании результатов дискриминантного анализа тройная диаграмма в координатах t_1 (тетрадный эффект La-Ce-Pr-Nd) - t_3 (тетрадный эффект Gd-Tb-Dy-Ho) – $(La/Sc)_{NASC}$ показывает дискретные различия в составе РЗЭ в изученных отложениях. Все исследованные слои разреза достоверно отличаются друг от друга по особенностям распределения РЗЭ и их фракционирования. Успешно осуществленная нами геохимическая привязка остатков млекопитающих открыла возможность датировать биостратиграфическим методом слои разреза Харабай.

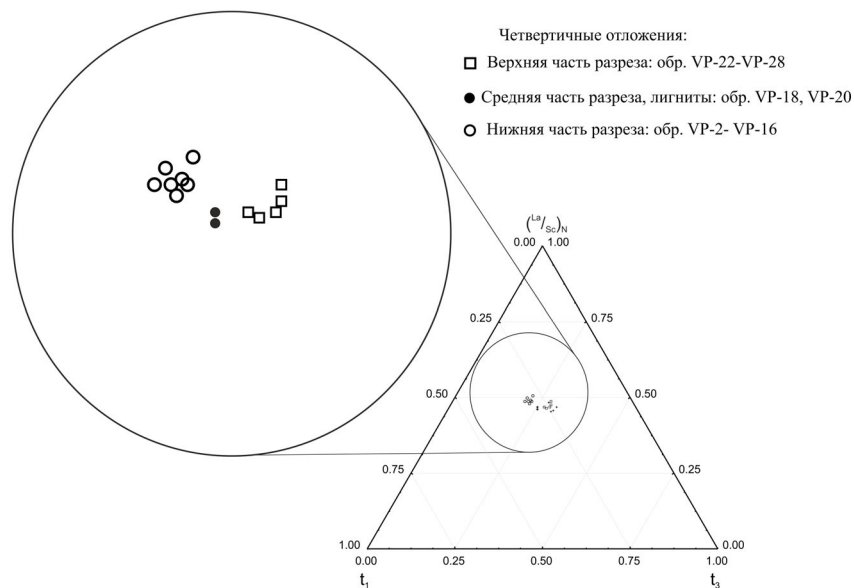


Рис. 16. Трехкомпонентная диаграмма состава РЗЭ отложений различных стратиграфических горизонтов (Харабай)

В низовьях р. Алдан вскрываются разновозрастные верхнекайнозойские отложения, заполняющие наиболее крупную в бассейне р. Лены Нижнеалданскую впадину. Чуйское и Тандинское обнажения на р. Алдан – наиболее известные и хорошо изученные. Представления о палеоэкологических условиях формирования слагающих их отложений до сих пор основывались исключительно на данных спорово-пыльцевого и микротериологического анализа. Климатические обстановки близки к субаридным. Во всех местонахождениях присутствуют формы млекопитающих, характерные для различных биотопов остепненной тундры, тундры и лесотундры. Ревизия разрезов этих обнажений проводилась в

2010-2011 гг. [Иванова и др., 2011; 2015]

Для общей характеристики отложений был проведен анализ петрохимических модулей (ГМ, ФМ, ЖМ, ТМ, КМ, НМ, ЩМ, НКМ) и индексов CIA, CIW, ICSV и PIA, подтверждающих генетическую общность пород источников сноса.

Диапазоны значений индексов интенсивности выветривания соответствуют субаридным обстановкам осадконакопления. На основании поведения лантаноидов, макро- и микроэлементов можно сделать выводы, что область сноса была неизменна во время формирования как среднемиоценовых, так и плейстоценовых отложений (близкое содержание микроэлементов во всех литологических разностях пород), при этом уменьшение индекса ICSV свидетельствует о возрастании роли флювиогляциального накопления и о резкой смене условий осадконакопления в сторону похолодания во время формирования неоплейстоценовых горизонтов.

5.6. Опорные разрезы позднего кайнозоя Байкальского региона.

Палеоэкологические реконструкции позднего кайнозоя Байкальского региона выполнены при петрохимическом и геохимическом изучении Усть-Одинского, Белоярского I (II) и Тологойского разрезов с использованием комплекса гранулометрических и литохимических методов, а также радиоуглеродного датирования. Разрезы палеокриогенных толщ содержат реликты отложений полярного покровного комплекса с их характерными чертами: выраженной окарбоначенностью, лессовидностью и практически повсеместным распространением следов палеокриогенеза – солифлюкции, мерзлотного трещинообразования, псевдоморфоз по ледяным жилам и т.д.

Усть-Одинский разрез является одним из ключевых обнажений Иркутского амфитеатра Сибирской платформы, фиксируя последовательность отложений всех изотопных стадий верхнего неоплейстоцена от МИС 5 до МИС 1. Проведен анализ петрохимических модулей ГМ, ФМ, ЖМ, ТМ, НМ, ЩМ, НКМ, АМ. За исключением ТМ, ЖМ и ФМ коэффициенты вариации укладываются в диапазон 15-26%, что может указывать на генетическую однородность источников сноса. Повышенная изменчивость железистых и титановых модулей характеризует проявления кор выветривания на водосборе.

Судя по значениям ЩМ, НКМ, ГМ, в исходных отложениях преобладают кварц и полевошпатовый шпат на общем фоне низкого содержания глинистых минералов. Среди глинистых минералов по соотношению ФМ-НКМ преобладают либо хлорит-(смектит)-гидрослюдистые агрегаты, либо гидрослюды, которым сопутствуют значительные примеси мельчайших частиц полевых шпатов.

Наблюдаемое по разрезу изменение геохимических палеомаркеров - Cu, Co, Cr, Zn, Sr/Ba, Co/Zr, Ba/Zr позволяет предположить, что повышенные содержания Cu, Co, Cr, Zn в осадках сартанского горизонта связаны с сорбцией этих элементов органическим веществом; в целом изменения климата надежно фиксируются распределением палеомаркеров - Sr/Ba, Co/Zr, Ba/Zr; в холодные периоды при наличии сезонноталого слоя Cu, Co, Cr, Zn, Sr выносятся более интенсивно, понижение значений коэффициентов маркирует наличие похолодания, и наоборот; наиболее резкие изменения климата происходили в

теплые стадии МИС 3 и МИС 5 (рис. 17).

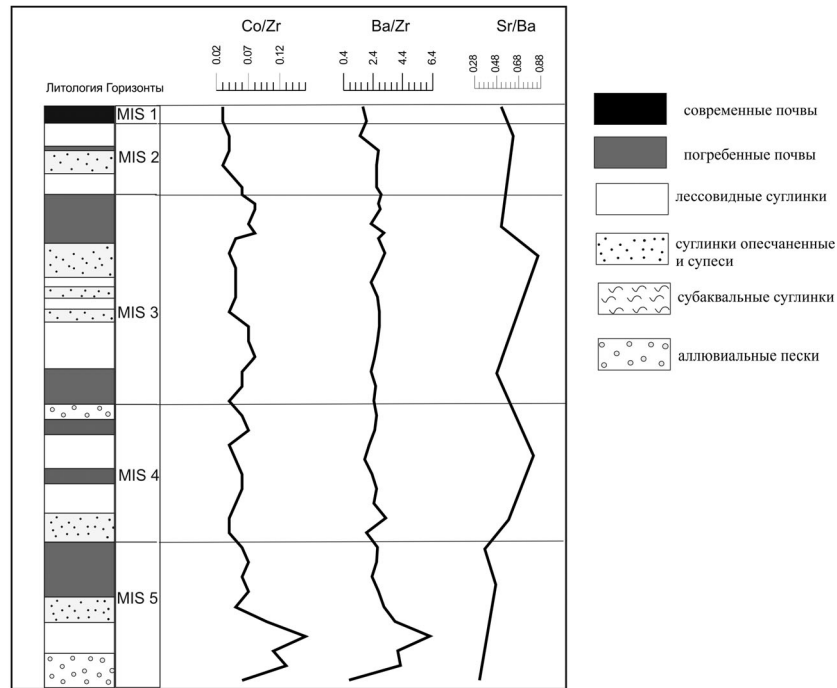


Рис. 17. Изменение геохимических коэффициентов. Усть-Одинский разрез.

В спектрах РЗЭ отложений разреза легкие лантаноиды преобладают при относительном дефиците тяжелых (отношение ЛРЗЭ/ТРЗЭ варьирует от 1.3 до 1.8). Во всех образцах отмечается заметный тетрадный эффект W-типа для 1 и 3 тетрады, однако максимально он проявлен в палеопочвах.

Разрез Белый Яр является одним из ключевых, но недоизученных разрезов квартала Прибайкалья. Хроностратиграфическая схема разреза стала формироваться лишь с пополнением радиоуглеродных датировок, установивших верхнеплейстоценовый возраст всей его песчаной толщи.

Вариации основных породообразующих оксидов, ППП и CO_2 для групп осадков, формировавшихся в холодных и теплых условиях, показаны на рис.18. Для осадков холодных периодов в общем характерен большой размах выборок, а медианные значения параметров близки к таковым в выборке осадков, формировавшихся в более теплых условиях. Этот факт свидетельствует, что распределение основных компонентов зависит и от гидродинамического режима водотока.

Эоловые пески формировались в сухие холодные периоды. Относительно теплым периодам соответствуют горизонты ископаемых почв и их рудиментов. Слой делювия отвечает теплому и влажному событию [Shchetnikov et al., 2013, 2015]. По имеющимся радиоуглеродным датам, формирование отложений началось в каргинское (МИС 3) и закончилось в сартанское время (МИС 2).

Вариации отношений главных петрохимических модулей во многом повторяют Усть-Одинский разрез. Климатические обстановки в области питания были семиаридными. Максимально теплые и влажные условия характерны для осадков каргинского времени. Далее происходит резкое похолодание, и осадконакопление проходит в более сухих и холодных условиях, с незначительными колебаниями.

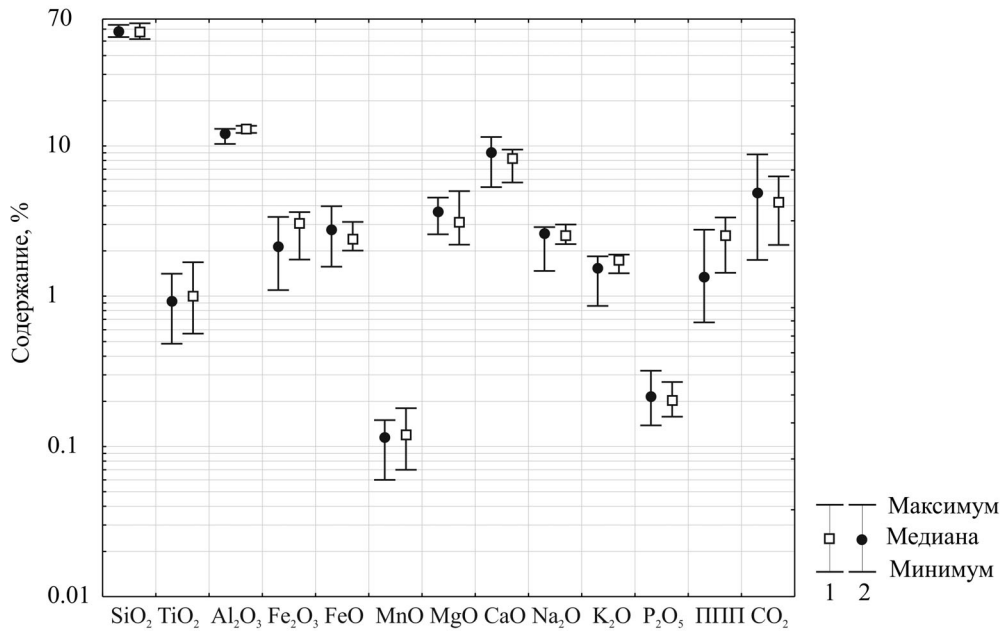


Рис.18. Вариации содержаний петрогенных компонентов для отложений разреза, формировавшихся в «теплых» (1) и «холодных» (2) условиях.

Отмеченные по петрохимическим модулям палеоэкологические изменения также отражаются в распределении палеомаркеров – Sr/Ba, Co/Zr, Ba/Zr и др.

Характер распределения РЗЭ для отложений разреза Белый Яр аналогичен таковому в отложениях Усть-Одинского разреза. Практически всем образцам свойственно слабое преобладание легких РЗЭ над тяжелыми (ЛРЗЭ/ТРЗЭ незначительно превышает 1). В спектрах РЗЭ присутствует статистически значимый тетрадный эффект близкий к W -типу для 3й тетрады. По сумме РЗЭ и иттрия породы разреза варьируют от 49 до 214 мг/кг, причем минимальные содержания РЗЭ и Y присущи супесям уровней 2-14 м, сформировавшимся в сарганское время. Отложения в целом отличаются относительным накоплением средних РЗЭ.

Тологойский разрез на р. Селенга завершает рассматриваемый нами трансект палеоэкологических реконструкций Восточной Сибири в плейстоцене. Он сложен отложениями позднего неоплейстоцена-эоплейстоцена, с размывом залегающими на образованиях плиоцена [Равский и др.,1964; Вангенгейм, 1977 и др.]. Отложения разреза характеризуются малыми вариациями содержаний петрогенных окислов, за исключением CaO и CO₂, и микроэлементов (кроме Cr). Выполнен расчет петрохимических модулей. Диапазон значений PIA соответствует семиаридным обстановкам осадконакопления. Периоды относительных потеплений выделяются по возрастанию CIA.

Наряду с ним, для оценки палеоклимата использованы и значения коэффициента ТМ, вариации которого свидетельствуют о накоплении осадков нижней толщи в условиях сухого аридного климата, а средней толщи – в условиях более холодного и влажного климата с усилением аридизации климата при накоплении осадков верхней части разреза. Резкое ухудшение климатических условий по геохимическим данным фиксируется между горизонтами палеопочв 1290-1500 см и 1650-1680 см: уменьшается содержание органики (ППП), падают содержания Co, Cu, Cr, уменьшаются содержания всех петрохимических индексов,

за исключением НКМ, характеризующего отношение легкорастворимых компонентов к глинистым, оно растет (количество глинистой фракции снижается, т.е. уменьшается интенсивность выветривания). По данным [Алексеева, 2005] именно в этом интервале разреза была зафиксирована крупная псевдоморфоза по ледяному клину с внедрением этой криогенной структуры в подстилающую почву и ее разрывом.

Континентальным обстановкам осадконакопления соответствует полученное для изученных отложений соотношение $La_N/Yb_N - La_N/Sm_N$. Ведущую роль в процессе фракционирования РЗЭ играли сорбционные процессы. Тетрадный эффект лантаноидов для третьей и четвертой тетрад статистически не значим. Полученные значения близки к М-типу. Максимальные изменения и близкие к порогу статистической значимости (0.2) величины тетрадного эффекта характерны для горизонтов палеопочв.

Климат во время формирования отложений разреза носил циклический характер: периоды увлажнения сменялись аридными эпохами разной интенсивности и продолжительности. Четко фиксируются этапы, в период которых на территории преобладали криогенные условия. Для отложений этих уровней характерны минимальные значения коэффициентов засоления, высокие - окисления, положительная европиевая аномалия, повышенные $\Sigma Ce/\Sigma Y$, пониженные La_N/Sm_N .

Основные выводы по главе 5 резюмируют доказательства третьего и четвертого тезиса работы. Главное следствие междисциплинарного анализа опорных разрезов квартара, образовавших трансекторальное сечение плейстоценовых отложений Восточной Сибири, состоит в том, что изменения окружающей среды в регионе в плейстоцене и голоцене привели к широкому распространению открытых ландшафтов. Сходные литолого-фациальные и геохимические условия плейстоценовой криолитозоны идентифицируются во всех изученных разрезах. Одновременно обеспечивается вычленение автохтонных фаунистических комплексов, уточняющих палеоэкологические интерпретации. Характер распределения РЗЭ в разрезах свидетельствует об однотипном составе и условиях преобразования пород.

Исследованные опорные разрезы четвертичных отложений распределены по территории современной криолитозоны Восточной Сибири случайным образом и имеют объективные различия по минералого-геохимическому составу субстрата. Но, безусловно, имеются и существенные черты сходства, к которым относится набор перигляциальных условий криогенного выветривания, транспортировки, отложения и диагенеза осадков. Конкретным выражением этого сходства являются отложения ледового комплекса и повсеместно проявленный полярный покровный комплекс. Единообразными природными факторами, действующими во всех изученных разрезах, являются многолетняя мерзлота (в т.ч. пластовые и жильные льды, лед-цемент), сезонноталый слой и зона годовых колебаний температуры, регламентирующие миграцию элементов в свободной и связанных водах. Эти факторы нивелируют все местные флюктуации состава четвертичных отложений, в том числе и фракционирование РЗЭ в ископаемых

минеральных и фаунистических компонентах плейстоценовых осадков Арктики, что придает им свойства количественных показателей палеокриогенных условий. На рисунке 19 выполнено сравнение поведения геохимических маркеров климата: холодного (А – плейстоцен Восточной Арктики и Северной Америки) и теплого (Б – плейстоценовый аллювий Африки, Австралии, Индии).

Показано, что фракционирование РЗЭ происходит под действием сорбционных и миграционных процессов, контролируемых климатическими особенностями седиментации и диагенеза покровных отложений изучаемого трансекта:

А – Эталонными условиями суровых климатов плейстоценовой криосферы служат разрезы ледового комплекса, деплетирование ЛРЗЭ в котором отражает с завидным постоянством криоаридизацию. Устойчивость маркера проявлена в постоянстве корреляционных зависимостей $La_N/Yb_N - La_N/Sm_N$ во всех разрезах, изменчивость которых его не нарушает.

Б – Разрезы отложений квартера с гумидными вариантами теплого климата представлены преимущественно аллювиальными толщами с доминированием флювиального переноса и сиаллитного выветривания и принципиально отличаются от разрезов арктического трансекта.

Таким образом, выборка проб в трансекте обнаруживает общие особенности спектра РЗЭ, которые можно считать проявлением палеоэкологического сигнала, соответствующего холодным континентальным условиям.

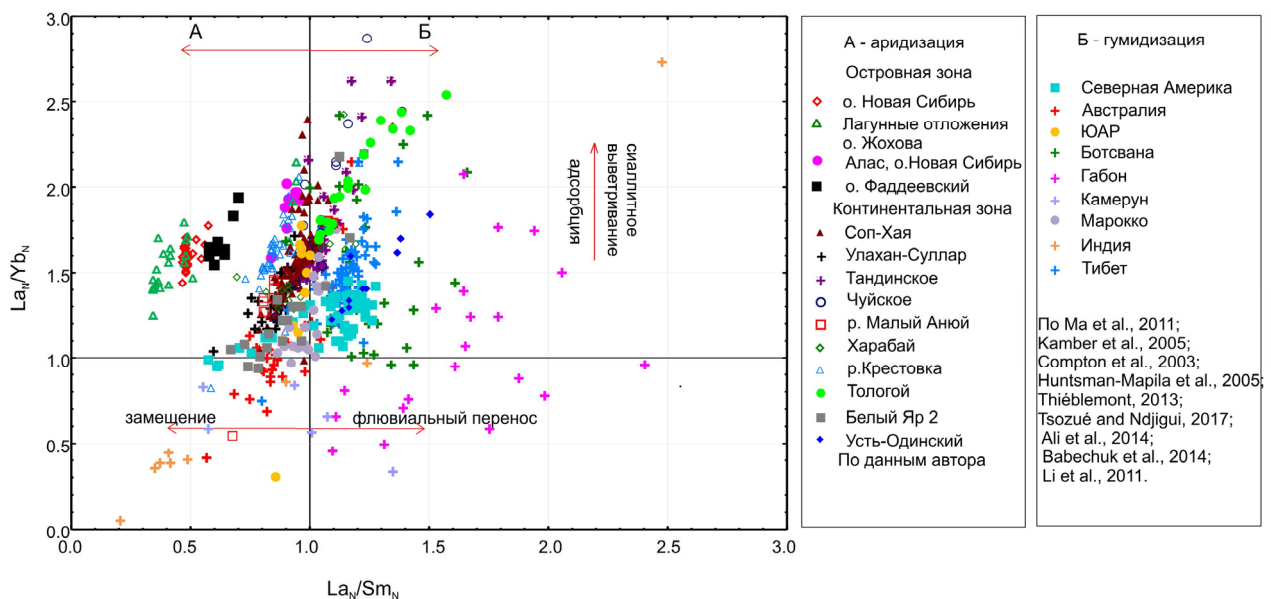


Рис. 19. Устойчивость и изменчивость палеоэкологического индекса на генеральной выборке (диаграмма $La_N/Yb_N - La_N/Sm_N$)

Заключение. Основные результаты научного исследования касаются палеогеографических реконструкций криогенных ландшафтов на основе выявленных закономерностей поведения РЗЭ, к которым относятся изменения геохимического спектра в результате фракционирования лантаноидов, обусловленного их различной миграционной способностью. Геохимические коэффициенты, отражающие этот процесс (La/Sm , La/Yb , $\Sigma Ce/\Sigma Y$, ЛРЗЭ/ТРЗЭ,

тетрадные эффекты), являются количественными показателями палеоклиматических условий. Они обосновывают тесную связь геохимических особенностей верхних горизонтов почв, насыщенных органическим веществом, с гидрохимическим режимом водных объектов криолитозоны. При этом использование геохимических методов позволяет существенно усилить достоверность палеорекоkonструкций и повышает разрешающую способность используемых методов для палеогеографического анализа. Важным методическим достижением работы является разработка методики стратиграфической привязки подъемного палеонтологического материала, основанной на изучении спектров РЗЭ в ископаемых костных остатках. Спектры РЗЭ_N в костных остатках из различных стратиграфических горизонтов различаются, являясь уникальными показателями условий их образования.

Эти новые данные в диссертации использованы как одно из средств расшифровки палеоэкологических обстановок, что, в свою очередь, позволяет сформулировать принципиальные положения литолого-геохимической идентификации полярного покровного комплекса на территории Восточной Сибири: развитый на разнообразных четвертичных отложениях, он обладает специфическими свойствами спектра РЗЭ. Присущая четвертичным отложениям климатическая ритмичность также отражается в характере фракционирования РЗЭ, что и позволяет использовать этот параметр для детального восстановления ритмичности палеоклиматических условий.

По результатам исследований можно считать установленным, что в неоплейстоцене после стабилизации биосферных условий в большинстве субрегионов Северной Евразии при развитии покровного и подземного оледенения существовали следующие циркумполярные природные зоны: полярная пустыня (с эпицентрами покровных и горно-долинных ледников и фрагментами речной и озерной сети), засушливые холодные степи, сочетающиеся на юге Западной и Восточной Сибири с темнохвойной тайгой. Учитывая гигантские размеры блоков земной коры, соответствующих этим природным обстановкам, стабильность массоэнергопотоков западного планетарного переноса и буферные свойства километровой толщи мерзлых пород, необходимо признать высочайшую устойчивость геохимических циклов миграции вещества на рассматриваемой территории. Латеральный перенос, в основном дисперсных продуктов криогенного выветривания, осуществлялся в эпохи межледниковий при оживлении стоковых процессов, тогда как в остальное время доминировали эоловые и склоновые перемещения.

Главное следствие комплексного анализа опорных разрезов квартера, образовавших рассмотренное транссекторальное сечение плейстоценовых отложений Восточной Сибири, состоит в том, что изменения окружающей среды в плейстоцене и голоцене привели к широкому распространению открытых ландшафтов. Сходные литолого-фациальные и геохимические условия плейстоценовой криолитозоны идентифицируются во всех изученных разрезах. Одновременно обеспечивается вычленение автохтонных фаунистических комплексов, уточняющих палеогеографические интерпретации.

Основные научные публикации по теме диссертации
Научные публикации, входящие в список ВАК Минобрнауки России

1. **Иванова В.В.** Лагунные отложения острова Жохова: возраст, условия формирования и значение для палеогеографических реконструкций региона Новосибирских островов / Анисимов М.А., **Иванова В.В.**, Пушина З.В., Тумской В.Е., Питулько В.В. // Известия РАН, серия географическая. – 2009. – №5. – С. 107– 119. (1/0.3 п.л.)
2. **Иванова В.В.** Пластовые льды Новосибирских островов как реликт древнего оледенения / Анисимов М.А., Тумской В.Е., **Иванова В.В.** // Материалы гляциологических исследований. – 2006. – № 101. – С. 143– 145. (0.3/0.1 п.л.)
3. **Иванова В.В.** Геохимические спектры лантаноидов в донных отложениях восточной части Финского залива / **Иванова В.В.** // Горный журнал. – 2013. – №11. – С. 85– 88. (0.3 п.л.)
4. **Иванова В.В.** Геохимия пластовых льдов острова Новая Сибирь (Новосибирские о-ва, Российская Арктика) как отражение условий их генезиса / **Иванова В.В.** // Криосфера Земли. – 2012. – № 1. – С. 56– 71. (1 п.л.)
5. **Иванова В.В.** Особенности криолитогенеза в лагунных отложениях острова Жохова / **Иванова В.В.**, Анисимов М.А. // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2009. – № 2(82), с. 95– 105. (1.25/0.9 п.л.)
6. **Иванова В.В.** Геохимическая характеристика донных отложений в зоне покмарков в Восточной части Финского залива / **Иванова В.В.**, Кириевская Д.В., Болотов А.Е. // Балтийский регион. – 2011. – № 1. – С.78– 89. (0.75/0.4 п.л.)
7. **Иванова В.В.** Геохимические индикаторы палеоклиматических изменений в кайнозойских отложениях Нижнеалданской впадины / **Иванова В.В.**, Никольский П.А., Тесаков А.С., Басилян А.Э., Белолубский И.Н., Боескоров Г.Г.. // Геохимия. – 2015. – № 4. – С.375–387. (0.75/0.4 п.л.)
8. **Иванова В.В.** Палеоэкологическая интерпретация особенностей фракционирования редкоземельных элементов в эмали зубов ископаемых мелких млекопитающих (Усть–Одинский разрез, Предбайкалье) / **Иванова В.В.**, Щетников А.А., Семеней Е.Ю., Филинов И.А. // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – 2015. – № 3 (52).– С. 105–119. (0.75/0.4 п.л.)
9. **Иванова В.В.** Литолого-геохимические особенности отложений Усть–Одинского опорного разреза верхнего неоплейстоцена Иркутского амфитеатра Сибирской платформы. / **Иванова В.В.**, Щетников А.А., Филинов И.А., Вещева С.В., Казанский А.Ю., Матасова Г.Г. // Литология и полезные ископаемые. – 2016. – № 3. – С. 215–232. (1/0.4 п.л.)
10. **Иванова В.В.** Тафономия, пространственное распространение, состав и сезонность фаунистических остатков из раскопок Жоховской стоянки, о-ва Де Лонга, Восточно–Сибирская Арктика (сезоны 2000 – 2005 гг. с добавлением материала 1989 и 1990 гг.) / Питулько В.В., **Иванова В.В.**, Каспаров А.К., Павлова Е.Ю. // Археологические вести. – 2013. – № 19. – С. 26–74. (2.2/0.55 п.л.)
11. **Иванова В.В.** Жоховская стоянка: геология и каменная индустрия (предварительный обзор работ 2000— 2005 гг.). / Питулько В.В., Павлова Е.Ю., **Иванова В.В.**, Гиря Е.Ю. // Stratum plus: Archaeology and Cultural Anthropology. – 2012. – № 1. – С. 211–256. (2.2/0.5 п.л.)
12. **Иванова В.В.** Опорный разрез Тологой (верхний кайнозой, Забайкалье): реконструкция условий и особенностей осадконакопления / **Иванова В.В.**, Ербаева М.А., Щетников А.А., Казанский А.Ю., Матасова Г.Г., Алексеева Н.В., Филинов И.А., Кузьмин М.И. // Геология и Геофизика. - 2020. - Т.61. - №12. - С. 1672- 1691. (1.2/0.5 п.л.)
13. **Ivanova V.V.** Stratigraphic interpretation of rare earth element signatures in Pleistocene mammal bones: A case study from Kharabai site, East Siberia / **Ivanova, V.V.**, Nikolskiy, P.A., Basilyan, A.E. // Quaternary International.– 2017. – V.445. – P. 279–288. DOI 10.1016/j.quaint.2016. 10.038 (0.7/0.4 п.л.)
14. **Ivanova V.V.** Tologoi key section: A unique archive for pliocene–pleistocene paleoenvironment dynamics of Transbaikalia, Baikal rift zone / **Ivanova V.V.**, Erbajeva M.A., Shchetnikov A.A., Kazansky A.Yu., Matasova G.G., Alexeeva N.V., Filinov I. A. // Quaternary International. – 2019. –

- V.519. – P. 58–73. DOI: 10.1016/j.quaint.2018.11.004. (1/0.4 п.л.)
15. **Ivanova V.V.** The Late Pleistocene Bokhan site (Fore-Baikal area, Russia) and its palaeoenvironmental reconstruction / Khenzykhenova, F., Yoshida, K., Sato, T., Shchetnikov, A., Osipova, E., Danukalova, G., **Ivanova V.V.**, Simakova, A., Filinov, I., Semenei, E., Namzalova, O., Tumurov, E., Malikov, D. // *Quaternary International*. – 2019. – V.534. – P. 197-210. DOI 10.1016/j.quaint.2019.04.023. (1/0.1 п.л.)
 16. **Ivanova V.V.** The evolutionary history of dogs in the Americas / Leathlobhair M., Perri A., Irving-Pease E., Witt K., Linderholm A., Haile J., Lebrasseur O., Ameen C., Blick J., Boyko A., Brace S., Cortes Y., Crockford S., Devault A., Dimopoulos E., Eldridge M., Enk J., Gopalakrishnan S., Gori K., Grimes V., Guiry E., Hansen A., Hulme-Beaman A., Johnson J., Kitchen A., Kasparov A., Kwon Y., Nikolskiy P., Lope C., Manin A., Martin T., Meyer M., Myers K., Omura M., Rouillard J., Pavlova E., Sciulli P., Sinding M., Strakova A., **Ivanova V.**, Widga C., Willerslev E., Pitulko V., Barnes I., Gilbert M., Dobney K., Malhi R., Murchison E., Larson G., Frantz L. // *Science* – 2018. – № 361(6397). – P. 81–85. <https://doi.org/10.1126/science.aao4776>. (0.25/0.03 п.л.)
 17. **Ivanova V.V.** The oldest art of the Eurasian Arctic: personal ornaments and symbolic objects from Yana RHS, Arctic Siberia / Pitulko V.V., Pavlova E.Y., Nikolskiy P.A., **Ivanova V.V.** // *Antiquity*. – 2012. – V. 86, № 333. – P. 642– 659. <https://doi.org/10.1017/S0003598X00047827> (1/0.25 п.л.)
 18. **Ivanova V.V.** Reconstructing Prey Selection, Hunting Strategy and Seasonality of the Early Holocene frozen site in the Siberian High Arctic: a Case Study on the Zhokhov Site faunal remains, De Long Islands / Pitulko, V.V., **Ivanova V.V.**, Kasparov A.K., Pavlova E.Y. // *Environmental Archaeology: The Journal of Human Palaeoecology*. – 2015. – № 20 (2). – P. 120– 157. doi:10.1179/1749631414y.0000000040. (2/0.4 п.л.)
 19. **Ivanova V.V.** Genomes of Pleistocene Siberian Wolves Uncover Multiple Extinct Wolf Lineages. / Ramos-Madriral J., Sinding M.S., Carøe C., Mak S.S.T., Niemann J., Samaniego Castruita J.A., Fedorov S., Kandyba A., Germonpré M., Bocherens H., Feuerborn T.R., Pitulko V.V., Pavlova E.Y., Nikolskiy P.A., Kasparov A.K., **Ivanova V.V.**, Larson G., Frantz L.A.F., Willerslev E., Meldgaard M., Petersen B., Sicheritz-Ponten T., Bachmann L., Wiig Ø., Hansen A.J., Gilbert M.T.P., Gopalakrishnan S. // *Current Biology*. 2021. 11;31(1):198-206. . DOI: 10.1016/j.cub.2020.10.002. (0.5/0.03 п.л.)
 20. **Ivanova V.V.** Upper Paleolithic site Tuyana – a multi-proxy record of sedimentation and environmental history during the Late Pleistocene and Holocene in the Tunka rift valley, Baikal region / Shchetnikov, A.A., Bezrukova, E.V., Matasova, G.G., Kazansky, A.Yu., **Ivanova, V.V.**, Danukalova, G.A., Filinov, I.A., et al. // *Quaternary International*. – 2019. – V.534. – P. 138–157. DOI: 10.1016/j.quaint.2019.02.043. (1.25/0.2 п.л.)
 21. **Ivanova V.V.** Arctic-adapted dogs emerged at the Pleistocene-Holocene transition. / Sinding M.S., Gopalakrishnan S., Ramos-Madriral J., de Manuel M., Pitulko V.V., Kuderna L., Feuerborn T.R., Frantz L.A.F., Vieira F.G., Niemann J., Samaniego Castruita J.A., Carøe C., Andersen-Ranberg E.U., Jordan P.D., Pavlova E.Y., Nikolskiy P.A., Kasparov A.K., **Ivanova V.V.**, Willerslev E., Skoglund P., Fredholm M., Wennerberg S.E., Heide-Jørgensen M.P., Dietz R., Sonne C., Meldgaard M., Dalén L., Larson G., Petersen B., Sicheritz-Pontén T., Bachmann L., Wiig Ø., Marques-Bonet T., Hansen A.J., Gilbert M.T.P. // *Science*. 2020 26; 368(6498):1495-1499. DOI: 10.1126/science.aaz8599. (0.25/0.03 п.л.)
 22. **Ivanova V.V.** LA-ICP-MS analysis of rare earth elements in tooth enamel of fossil small mammals (Ust-Oda section, Fore-Baikal area, Siberia): paleoenvironmental interpretation. / **Ivanova V.V.**, Shchetnikov, A., Semenei, E., Filinov, I. and Simon, K. // *Journal of Quaternary Sciences*. – 2022 – V. 37 (7) –P. 1246-1260. DOI: 10.1002/jqs.3428. (1.6/1.1 п.л.)
- Другие научные публикации**
23. **Иванова В.В.** Изменения уровня моря на Арктическом шельфе в районе Новосибирских островов в голоцене / Анисимов М.А., **Иванова В.В.**, Пушина З.В., Павлова Е.Ю., Питулько В.В. // *Материалы Международной научной конференции, посвященной 100- летию со дня рождения Д.Г. Панова: «Геология, география и экология океана» (8–11 июня 2009 г., г. Ростов–на–Дону)*. –Ростов-на-Дону, 2009. — с.18. (0.2/0.05 п.л.)
 24. **Иванова В.В.** Условия формирования лагунных отложений острова Жохова, как результат

- изменения уровня моря в голоцене / Анисимов М.А., **Иванова В.В.**, Пушина З.В., Питулько В.В. // *Материалы XLII Тектонического совещания*. – Москва: ГЕОС, 2009.— т.1. – С.12. (0.2/0.05 п.л.)
25. **Иванова В.В.** История изменений уровня моря в районе Новосибирских о-вов в голоцене / Анисимов М.А., Пушина З.В., **Иванова В.В.**, Павлова Е.Ю., Питулько В.В. // *Палеонтология, стратиграфия и палеогеография мезозоя и кайнозоя бореальных районов*. «Седьмые Саксовские чтения», 18–22 апреля 2011 г. — Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2011.— Том I — С. 10–13. (0.3/0.07 п.л.)
 26. **Иванова В.В.** Пластовые льды Новосибирских островов как реликт древнего оледенения / Анисимов М.А., Тумской В.В., **Иванова В.В.** // *Восьмой гляциологический симпозиум, Сокращение гляциосферы: факты и анализ. Тезисы докладов*. — Спб., 2004.— С. 37–38. (0.1/0.03 п.л.)
 27. **Иванова В.В.** Новые данные по изменению уровня моря в районе Новосибирских островов / Анисимов М.А., Тумской В.В., **Иванова В.В.**, Пушина З.В. // *Научная конференция «Моря высоких широт и морская криосфера. Тезисы докладов»*. — СПб, 2007. — С. 21–22. (0.2/0.05 п.л.)
 28. **Иванова В.В.** Особенности строения кайнозойских разрезов, содержащих пластовые льды на Карском побережье Югорского полуострова / Букасс А. С., Бартова А. В., Клевцов А. С., Зархидзе Д. В., **Иванова В.В.** // *Геология и минерально– сырьевые ресурсы Европейского Северо–Востока России. Материалы XVI геологического съезда республики Коми 15–17 апреля 2014 г.* — Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УРО РАН, 2014.— Том 2.— С.9–11. (0.2/0.04 п.л.)
 29. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Лаптево–Сибироморская. Лист S–53 – о. Столбовой, S–54 – Ляховские о-ва. Объяснительная записка. / Бургуто А. Г., Дорофеев В. К., Рекант П. В., Шкарубо С. И., Журавлёв, В. А., Зуйкова, О. Н., **Иванова В.В.** [и др.]. — СПб: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2016. 300 с. (19/1 п.л.)
 30. **Иванова В.В.** Опорный разрез Тологой как уникальный архив динамики природной среды позднего кайнозоя Байкальского региона / Ербаева М.А., Алексеева Н.В., Щетников А.А., **Иванова В.В.**, Филинов И.А., Хензыхенова Ф.И., Андреева Д.Б., Намзалова О.Д.Ц. // *В сб. Геодинамика и минерагения Северной и Центральной Азии. Материалы V Всероссийской научно–практической конференции, посвященной 45– летию Геологического института СО РАН, 2018.* — С. 167–169. (0.2/0.05 п.л.)
 31. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Северо–Карско–Баренцевоморская. Лист R–39,40 – о. Колгуев – прол. Карские Ворота. Объяснительная записка. / Журавлёв, В. А., Кораго, Е.А., Костин, Д.А., Зуйкова, О. Н., **Иванова В.В.** [и др.]. — СПб: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2014. 405 с. (25.5/1 п.л.)
 32. **Иванова В.В.** Геохимические особенности ископаемых пластовых льдов о. Новая Сибирь как отражение их генезиса / **Иванова В.В.** // *Палеонтология, стратиграфия и палеогеография мезозоя и кайнозоя бореальных районов*. «Седьмые Саксовские чтения», 18–22 апреля 2011 г. — Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2011. — Том I. — С. 62 – 66. (0.25 п.л.)
 33. **Иванова В.В.** Редкоземельные элементы в отложениях плейстоцена Центральной и Восточной Якутии / **Иванова В.В.** // *Материалы совместной международной конференции «Геоморфология и палеогеография полярных регионов», Санкт–Петербург, 9– 17 сентября 2012 г.* — СПб, 2012. — с. 199–203. (0.25 п.л.)
 34. **Иванова В.В.** Геохимия позднплейстоценовых и голоценовых отложений острова Новая Сибирь / **Иванова В.В.**, Анисимов М.А. // *В сб. «Материалы международного совещания «Экология северных территорий России. Проблемы, прогноз ситуации, пути развития, решения»*. — Архангельск, 2002. — т.2. — с. 167–172. (0.3/0.2 п.л.)
 35. **Иванова В.В.** Особенности криолитогенеза в лагунных отложениях о. Жохова / **Иванова В.В.**, Анисимов М.А. // *Моря высоких широт и морская криосфера. Тезисы докладов*. – СПб, 2007.– С. 46. (0.1/0.08 п.л.)
 36. **Иванова В.В.** Предварительная оценка состояния природной среды архипелага Земля Франца–Иосифа / **Иванова В.В.**, Куликов И.В., Костева Н.К., Погорельский А.И. // *В сб. Тез.конф.«Полярные области Земли: геология, тектоника, ресурсное значение, природная*

- среда». — С– Петербург, 2001. — с. 231–232. (0.1/0.05 п.л.)
37. **Иванова В.В.** Геохимия четвертичных отложений в низовьях реки Адыча (северная Якутия) / **Иванова В.В.**, Никольский П.А. // *Материалы V Всероссийского совещания по изучению четвертичного периода.* – Москва: ГЕОС, 2007. — с. 151–153. (0.2/0.15 п.л.)
 38. **Иванова В.В.** Использование РЗЭ для корректной датировки подъемного палеонтологического материала по стратиграфическим горизонтам типоморфных голоцен–плейстоценовых разрезов приморских низменностей Северной Якутии / **Иванова В.В.**, Никольский П.А. // В кн.: *Материалы Первой международной научной конференции «Геология, геохимия и экология Северо– Запада РФ».*— СПб, 2005. — с.121– 128. (0.5/0.3 п.л.)
 39. **Иванова В.В.** О методе стратиграфической привязки ископаемых фаунистических остатков на основе выявления особенностей фракционирования редкоземельных элементов в их химическом составе (на примере ключевых разрезов плейстоцена Северной Якутии) / **Иванова В.В.**, Никольский П.А. // *Материалы IX Всероссийского совещания по изучению четвертичного периода (г. Иркутск, 15–20 сентября 2015 г.).* – Иркутск: Издательство Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2015. – с. 180– 182. (0.2/0.15 п.л.)
 40. **Иванова В.В.** Особенности фракционирования редкоземельных элементов в ископаемых костных остатках из разреза плейстоценовых отложений Крестовка (низовья р. Колымы) / **Иванова В.В.**, Никольский П.А. // *Актуальные проблемы палеогеографии и стратиграфии плейстоцена: Материалы Всероссийской конференции «Марковские чтения 2015 года».* – М.: Географический факультет МГУ, 2015.– с.70–73. (0.25/0.2 п.л.)
 41. **Иванова В.В.** Практика применения метода стратиграфической привязки костей млекопитающих по особенностям их микроэлементного состава на северо– востоке России / **Иванова В.В.**, Никольский П.А. // *Материалы X Всероссийского совещания по изучению четвертичного периода.* Москва 25–29 сентября 2017. – М.: ГЕОС, 2017. – С. 152 – 154. (0.2/0.1 п.л.)
 42. **Иванова В.В.** Природа окраски ископаемой кости / **Иванова В.В.**, Никольский П.А. // *Международная мамонтовая конференция. Тезисы докладов.* — Якутск, 2007. — с. 54. (0.1/0.07 п.л.)
 43. **Иванова В.В.** Распределение редкоземельных элементов в ископаемых костных остатках как индикатор возраста / **Иванова В.В.**, Никольский П.А. // *Международная мамонтовая конференция. Тезисы докладов.* – Якутск, 2007. – с. 55. (0.1/0.07 п.л.)
 44. **Иванова В.В.** Результаты комплексного изучения разреза четвертичных отложений местонахождения фауны млекопитающих «Тандинское» в низовьях р. Алдан (Центральная Якутия) / **Иванова В.В.**, Никольский П.А., Басилян А.Э. // *Материалы VII Всероссийского совещания по изучению четвертичного периода (г. Апатиты, 12–17 сентября, 2011 г.).* – Апатиты, 2011. – Т. 1 (А–К).— с. 227–229. (0.3/0.15 п.л.)
 45. **Иванова В.В.** Литогеохимическая характеристика отложений опорного разреза Тологой (верхний кайнозой, Забайкалье) как отражение палеоклиматических условий их формирования / **Иванова В.В.**, Щетников А.А., Ербаева М.А., Алексеева Н.В., Филинов И.А. // *Современные направления развития геохимии. Материалы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 60-летию Института геохимии СО РАН и 100— летию со дня рождения академика Л.В. Таусона.* 18-23 сентября 2017 г. – Иркутск, 2017. — С. 115—116 (0.2/0.07 п.л.)
 46. **Иванова В.В.** Вещественный состав палеопочв Тологойского разреза (Забайкалье) как отражение палеоэкологических условий их формирования / **Иванова В.В.**, Щетников А.А., Ербаева М.А., Филинов И.А., Алексеева Н.В. // *Материалы X Всероссийского совещания по изучению четвертичного периода.* Москва 25– 29 сентября 2017 . – М.: ГЕОС, 2017. – С. 155 – 157. (0.2/0.07 п.л.)
 47. **Иванова В.В.** Палеоэкологическая интерпретация особенностей фракционирования редкоземельных элементов в эмали зубов ископаемых мелких млекопитающих (Усть–Одинский разрез, Предбайкалье) / **Иванова В.В.**, Щетников А.А., Семеней Е.Ю., Филинов И.А. // *Геология, геоэкология, эволюционная география: Коллективная монография. Том XIII* Под ред. Е. М. Нестерова, В. А. Снытко. – СПб.: Изд– во РГПУ им. А. И. Герцена, 2014. – с.118–122. (0.2/0.1 п.л.)

48. **Иванова В.В.** Литолого-геохимические особенности отложений плейстоценового разреза Улан—Жалга (Западное Забайкалье) / **Иванова В.В.**, Щетников А.А., Филинов И.А., Казанский А.Ю., Матасова Г.Г. // Актуальные проблемы палеогеографии плейстоцена и голоцена: Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Марковские чтения 2020 года» Отв. редакторы Н. С. Болиховская, Т. С. Ключиткина, Т. А. Янина. – М.: Географический факультет МГУ, 2020. – с. 152—156 (0.25/0.1 п.л.)
49. **Иванова В.В.** Особенности фракционирования редкоземельных элементов в ископаемых костных остатках из разреза плейстоценовых отложений Малые Голы (Предбайкалье) / **Иванова В.В.**, Щетников А.А., Филинов И.А., Казанский А.Ю., Матасова Г.Г. // Палеонтология, стратиграфия и палеогеография мезозоя и кайнозоя бореальных районов : Материалы научной онлайн-сессии, Новосибирск, 19–22 апреля 2021 года. Новосибирск: Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 2021. – С. 280—285. (0.3/0.2 п.л.)
50. **Иванова В.В.** Изотопный состав ископаемых льдов различного происхождения на севере Новосибирских островов и западе Яно–Индигирской низменности / Павлова Е.Ю., **Иванова В.В.**, Мейер Х., Питулько В.В. // Материалы IX Всероссийского совещания по изучению четвертичного периода (г. Иркутск, 15–20 сентября 2015 г.). – Иркутск: Издательство Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2015. – с. 349–352. (0.3/0.1 п.л.)
51. **Иванова В.В.** Искусство верхнего палеолита Арктической Сибири: личные украшения из раскопок Янской стоянки / Питулько В. В., Павлова Е.Ю., **Иванова В.В.** // Уральский исторический вестник.— 2014.— № 2 (43).— С. 6–17. (0.75/0.2 п.л.)
52. **Иванова В.В.** Производство и применение красного минерального красителя на палеолитической Янской стоянке (Восточная Якутия) / Питулько В. В., **Иванова В.В.** III Северный Археологический Конгресс. 8–12 ноября 2010 г. Ханты–Мансийск: тез. докл.— Ханты–Мансийск, 2010. — С. 46—47. (0.1/0.05 п.л.)
53. **Иванова В.В.** Янская стоянка: материальная культура и символическая деятельность верхнепалеолитического населения Сибирской Арктики / Питулько В. В., Павлова Е. Ю., Никольский П. А., **Иванова В.В.** // Российский археологический ежегодник. – 2012. – №2. – С. 33–102. (4/0.4 п.л.)
54. **Иванова В.В.** Символическая деятельность верхнепалеолитического населения Арктической Сибири (бусы и подвески Янской стоянки) / Питулько В.В., Павлова Е.Ю., Никольский П.А., **Иванова В.В.** // Историко–культурное наследие и духовные ценности России. – М.: РОССПЭН. – 2012. – С. 35–51. (1/0.3 п.л.)
55. **Иванова В.В.** Расселение человека в Сибирской Арктике в позднем неоплейстоцене и голоцене: новые материалы к археологической карте / Питулько В.В., Павлова Е.Ю., Никольский П.А., **Иванова В.В.**, Базилян А.Е., Анисимов М.А., Ремизов С.О. // В сборнике: IV Северный археологический конгресс. Доклады. – Ханты—Мансийск, 2015. — С. 152–176 (1/0.1 п.л.)
56. **Иванова В.В.** Новые данные о фауне млекопитающих раннего неоплейстоцена субарктической Восточной Сибири / Тесаков А.С., Никольский П.А., Боесков Г.Г., **Иванова В.В.**, Базилян А.Э., Белолобский И.Н., Фролов П.Д. // Териофауна России и сопредельных территорий: Материалы IX Съезда Териологического общества при РАН (Москва, 1—4 февраля, 2011 г.). Москва: Товарищество научных изданий КМК, 2011. — С.478. (0.1/0.01 п.л.)
57. **Ivanova V.V.** Stratigraphical interpretation of rare earth element signatures in fossil bones from the Pleistocene fauna site Kharabai, Central Yakutia / **Ivanova V.V.**, Nikolskiy, P.A. // Abstract Book of the VI—th International Conference on Mammoths and their Relatives.— S.A.S.G., 2014. — Special Volume 102. P. 74-75. (0.2/0.1 п.л.)
58. **Ivanova V.V.** Litho geochemistry of rocks of Tologoi key section (upper Cenozoic, Transbaikalia) as the reflection of paleoclimatic conditions of their formation / **Ivanova V.V.**, Shchetnikov A.A., Erbajeva M.A., Filipov I. A., Alexeeva N.V. // The 3rd ASQUA Conference, Jeju Island, Korea, 4—8 September, 2017. — P. 188-190. (0.2/0.05 п.л.)