

ОТЧЕТ

Ведущего ученого о научных исследованиях, проведенных в 2014-2016 гг.

Договор между Министерством образования и науки Российской Федерации, Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Институтом физики Земли им. О.Ю. Шмидта и Ивом Галле о выделении гранта Правительства Российской Федерации для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных организациях высшего образования, научных учреждениях, подведомственных Федеральному агентству научных организаций, и государственных научных центрах Российской Федерации от 24 марта 2014г. № 14.Z50.31.0017.

Область наук:

Науки о Земле и смежные экологические науки.

Направление научного исследования:

Эволюция геомагнитного поля и взаимодействие планетарных оболочек.

Наименование лаборатории:

Лаборатория Археомagnetизма и эволюции геомагнитного поля (№ 106).

Ведущий ученый

_____ /Ив Галле/

ОГЛАВЛЕНИЕ	
АННОТАЦИЯ	5
ВВЕДЕНИЕ	15
БЛОК 1: СОЗДАНИЕ НОВОЙ ЛАБОРАТОРНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ И РАЗРАБОТКА НОВЫХ МЕТОДОВ	20
1.1. Технические средства лаборатории	20
1.2. Разработка программного обеспечения	23
1.2.1. Программа разложения коэрцитивных спектров	23
1.2.2. Программа для обеспечения работы многофункционального палеомагнитного измерительного комплекса “Храмов-Палеомаг”	23
1.2.3. Разработка алгоритма и компьютерной программы, генерирующей распределения палеомагнитных направлений для модели геомагнитного поля с заданным набором членов сферического гармонического разложения	25
1.3. Разработка методов	31
1.3.1. Разработка метода регидроксилации на синтетических образцах	31
1.3.2. Разработка метода разложения коэрцитивных спектров применительно к анализу вариаций состава и характеристик магнитных фракций в осадочных разрезах.	38
1.3.3. Разработка методов учета влияния термохимических процессов окисления на формирование естественной остаточной намагниченности вулканитов и на результаты палеомагнитных исследований: теоретический и экспериментальный анализ	41
1.3.4. Детектирование занижения наклона в исследуемых осадочных породах и её коррекция лабораторными и аналитическими методами	47
1.3.5. Создание итогового ГИС-проекта на основе полученных в ходе работ по проекту геологических, структурных, палеомагнитных, археомагнитных, геохронологических и других данных	54
1.3.6. Разработка методов диагностики природы остаточной намагниченности в осадочных породах: Синтез основных Fe- содержащих минералов красноцветов с варьируемым размером зерен при различных условиях соосаждения	58
1.3.7. Разработка и тестирование нового экспериментального протокола по определению напряженности магнитного поля для коллекций, где наблюдается сильное влияние скорости создания термоостаточной намагниченности на конечный результат определения палеонапряженности	67
БЛОК 2: ПОСТРОЕНИЕ ОПОРНЫХ КРИВЫХ ПАЛЕОВЕКОВЫХ ВАРИАЦИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ РЕГИОНОВ РОССИИ И РАЗРАБОТКА ГЛОБАЛЬНОЙ МОДЕЛИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ГОЛОЦЕНА	71

2.1. Реконструкция палеовековых вариаций элементов геомагнитного поля на территории Европейской части России по данным исследования колонок донных отложений современных озер	71
2.2. Построение опорной кривой вековых вариаций геомагнитного поля на Камчатке в голоцене	89
2.3. Вариации геомагнитного поля на территории европейской части России в последнем тысячелетии	98
2.4. Эволюция геомагнитного поля на территории Ближнего Востока и Средней Азии на протяжении голоцена	106
2.5. Разработка глобальной модели геомагнитного поля голоцена	125
БЛОК 3: ИЗУЧЕНИЕ ЭВОЛЮЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ В ФАНЕРОЗОЕ И ДОКЕМБРИИ	133
3.1. Изучение амплитуды вековых вариаций геомагнитного поля на протяжении геологической истории	133
3.2. Напряженность геомагнитного поля на протяжении геологической истории	144
3.3. Характер изменения частоты геомагнитных инверсий на протяжении геологической истории	154
3.4. Модель инверсионного процесса	161
3.5. Интерпретация и синтез позднепермских палеомагнитных данных по объектам, расположенным вдоль палеомеридиана. Тестирование дипольности геомагнитного поля на границе перми и триаса	166
БЛОК 4: ИЗУЧЕНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ В ПОЗДНЕМ ДОКЕМБРИИ И ФАНЕРОЗОЕ	172
4.1. Палеомагнитное тестирование гипотезы Шенгера-Буртмана-Натальина (механизм формирования Центрально-Азиатского складчатого пояса)	172
4.2. Синтез палеомагнитных, геохронологических, геохимических, седиментологических и палеонтологических данных по венд-кембрийским разрезам севера Енисейского кряжа. Разработка модели тектонического развития региона.	182
4.3. Анализ данных по палеомагнетизму неопротерозоя Сибирской платформы. Разработка современной версии неопротерозойской кривой кажущейся миграции полюса для Сибирской платформы. Палеомагнитные ограничения на конфигурацию суперконтинента Родиния	203
4.4. Палеомагнетизм верхнеэдиакарских обломочных пород Южного Урала и палеогеографическое положение Балтики в конце неопротерозоя	213

4.5. Разработка модели тектонической эволюции Байкало-Патомской складчатой области в позднем докембрии – палеозое	219
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	233
ЛИТЕРАТУРА	241

Аннотация.

В 2014-2016 гг. под научным руководством Ведущего Ученого И. Галле выполнялись исследования по Проекту “Эволюция геомагнитного поля и взаимодействие планетарных оболочек”. Для реализации этого проекта на базе Института Физики Земли РАН была организована лаборатория Археомagnetизма и эволюции магнитного поля. В состав лаборатории вошли, как уже известные исследователи, так и молодые сотрудники, только начинающие свою научную карьеру.

Основными целями Проекта были: (1) создание современной археомagnetной лаборатории мирового класса; (2) получение новых ключевых данных об эволюции магнитного поля Земли на разных масштабах времени: от сотен до сотен миллионов лет; (3) использование этих данных для изучения связи процессов, происходящих во внутренних и внешних оболочках нашей планеты.

Для достижения этих целей для каждого года работ были сформулированы конкретные задачи, общим число 42, которые можно объединить в следующие блоки, отвечающие глобальным задачам Проекта: Блок 1: Создание новой лабораторной инфраструктуры и разработка новых методов; Блок 2: Построение опорных кривых палеовековых вариаций геомагнитного поля для различных регионов России и разработка глобальной модели магнитного поля голоцена; Блок 3. Изучение эволюции магнитного поля Земли в фанерозое и докембрии. Блок 4. Изучение геодинамической эволюции Северной Евразии в фанерозое и позднем докембрии.

В ходе исследований по теме Проекта получены следующие основные результаты:

Блок 1: Создание новой лабораторной инфраструктуры и разработка новых методов.

Создана современная археомagnetная лаборатория, оборудованная передовой аппаратурой, позволяющей выполнять высокоточные исследования археологических артефактов и определять по ним напряженность древнего геомагнитного поля. Из молодых сотрудников Лаборатории подготовлен персонал, владеющий передовыми методами археомagnetных исследований и обладающий собственным (приобретенным в ходе выполнения Проекта) опытом решения археомagnetных задач. После установки и запуска трехосного магнитометра “Triaxе”, которые планируется осуществить в 2017 г., Лаборатория войдет в число лучших археомagnetных лабораторий мира.

Полностью укомплектована петро-палеомagnetная лаборатория. Приобретена, запущена в работу и активно эксплуатируется система MicroMag™ 3900 Series Vibrating

Sample Magnetometer (VSM) производства Princeton Measurements Corporation (США), позволяющая с высокой точностью и высокой производительностью выполнять широкий спектр петромагнитных измерений, часть из которых (например, снятие FORC-диаграмм) доступна только при использовании этого прибора.

Для этого прибора дополнительно разработана компьютерная программа (ПО), в которой на основе специального математического алгоритма, основанного на технике неотрицательной матричной факторизации, реализована возможность выполнять разложения коэрцитивных спектров с целью выделения основных носителей намагниченности в осадочных разрезах, донных колонках озерных и океанических отложений. Этот алгоритм (метод) дает возможность проследить вариации содержания и свойств носителей намагниченности в разрезах на протяжении времени их формирования, с последующей их интерпретацией в терминах палеоклиматологии и палеоэкологии.

Разработано также ПО, позволяющее с учетом конструктивных особенностей измерительного комплекса «Храмов» через единый интерфейс выполнять комплексные палеомагнитные измерения. Разработано и реализовано в коде ПО для конвертирования разных стандартов хранения палеомагнитных данных. За счет доработки и отладки программного кода стандартной версии программы-интерфейса криогенного магнитометра 2G Enterprises существенно повышена стабильность работы палеомагнитного измерительного комплекса «Храмов». Для этого ПО создана серия инструкций, ориентированная на конечного пользователя.

Выполнена серия экспериментов, направленных на изучение надежности и перспектив применения метода регидроксилационного датирования (RHX) археологических объектов (Wilson et al., 2003). Для анализа отходящих при прогреве газов предложен и опробован метод синхронного термогравиметрического и дифференциального сканирующего калориметрического анализа, сопряженный с масс-спектрометрией. С использованием этого метода получены новые результаты, важные для понимания границ применимости метода RHX. Полученные данные, в целом, подтверждают описание процесса дегидроксилации (Wilson et al., 2003), внося в это описание важные коррективы, указывающие на то, что характеристики исследуемого процесса зависят от значительно большего числа факторов, чем это считалось ранее. Выполненные эксперименты имеют принципиальное значение для применения RHX метода, поскольку указывают на важный источник возможной ошибки при определении возраста и демонстрируют значение предложенного метода комбинированных измерений.

Выполнено экспериментальное и теоретическое исследование свойств термохимической намагниченности (TCRM), возникающей при изотермическом отжиге образцов

горных пород, содержащих титаномагнетиты. Показано, что приобретение TCRM происходит на стадии преимущественно однофазного окисления и может быть геологически мгновенным. Выполнена серия экспериментов по определению напряженности древнего магнитного поля (палеонапряженности) методом Телье-Коэ на образцах, содержащих TCRM. Проведено численное моделирование методом Монте-Карло процесса образования TCRM в системе однодоменных взаимодействующих частиц и моделирование метода определения палеонапряженности по процедуре Телье-Коэ. Показано, что данные по палеонапряженности, полученные по методике Телье-Коэ на образцах, содержащих TCRM, могут давать существенное занижение величины древнего поля. По экспериментальным данным и по результатам численного моделирования выполнена количественная оценка степени занижения величины палеонапряженности.

Изучены факторы, влияющие на свойства синтезированных гетитов. Выявлена зависимость размеров зерен гетита и степени его раскристаллизованности от условий эксперимента. Показано, что хотя сами частицы гетита, осажденные из природных растворов, могут не вносить существенный вклад в формирование естественной намагниченности осадочных пород, их последующая дегидратация может приводить к образованию устойчивых магнитных фаз, свойства которых будут зависеть от свойств исходного гетита. Такой процесс может рассматриваться как один из вероятных при образовании естественной остаточной намагниченности красноцветов и должен учитываться при интерпретации палеомагнитных результатов.

Выполнена проверка согласованности результатов, получаемых статистическими и лабораторными методами оценки занижения наклонения в осадочных породах. В частности, оценены коэффициенты занижения наклонения в пермо-триасовых осадочных породах Центральной России, Южной Франции и Центральной Германии. Показано, что в ряде случаев, в зависимости от литологической характеристики пород, коэффициент занижения наклонения может достигать аномально низких значений.

Разработан и протестирован новый экспериментальный протокол по определению напряженности магнитного поля для коллекций, где наблюдается сильное влияние скорости создания термоостаточной намагниченности на конечный результат определения палеонапряженности.

Разработан оригинальный алгоритм, позволяющий генерировать распределения и временные последовательности палеомагнитных направлений для заданных моделей геомагнитного поля с заданным набором членов сферического гармонического разложения. На основе этого алгоритма создано ПО и инструкция по его использованию для широкого круга исследователей, работающих в области геомагнетизма.

На основе WEB-платформы – ScanEx Web Geomixer, ArcGIS Online создан итоговый ГИС-проект, включающий полученные в ходе работ по Проекту результаты мультидисциплинарных исследований, публикации и характеристику изученных объектов.

Блок 2: Построение опорных кривых палеовековых вариаций геомагнитного поля для различных регионов России и построение глобальной модели геомагнитного поля для голоцена.

С использованием специализированного донного бурового аппарата и с учетом полученных сейсмоакустических результатов отобранны керновые колонки озерных отложений мощностью до 6 м из озер Рубское (Ивановская область), Плещеево (Ярославская область), Кисегач (Челябинская область), Кандрыкуль (Республика Башкортостан). Проведен детальный послойный отбор образцов (более 4000) для лабораторных исследований, включающих палеомагнитный, лимномагнитный, палеобиологический анализы. Радиоуглеродный изотопный возраст осадков определен в лаборатории университета ЕТН (Цюрих, Швейцария). На основе полученных данных, для каждого из исследуемых озер построены временные модели накопления осадков и дана оценка скоростей осадконакопления. Выделена компонента намагниченности, несущая информацию о геомагнитном поле времени накопления осадков, получена временная развертка соответствующих параметров геомагнитного поля (склонения, наклонения, относительной напряженности). Определены климатозависимые петромагнитные параметры, характеризующие влажность, температурные характеристики, изменения солености, геохимических условий осадконакопления и др. По вариациям этих параметров выполнена реконструкция голоценовых климатических изменений в соответствующих регионах. По петромагнитным параметрам выполнена корреляция палеомагнитных записей изученных донных колонок и построены геомагнитные мастер-кривые для голоцена для озер Плещеево и Рубское. Полученные мастер-кривые существенно пополняют геомагнитную базу данных (БД) по голоцену Центральной России и Приуралья и, будучи сопоставлены с опубликованными лимномагнитными данными по озерам Восточной и Западной Европы, позволяют определить характерные особенности, описывающие изменения геомагнитного поля голоцена в региональном масштабе и в масштабе Европы в целом.

Впервые с использованием современной методики и приборной базы получены палеонаправления геомагнитного поля позднего голоцена (последние 4000 лет) для 13 стратиграфических уровней Камчатки. На этой основе построена опорная кривая вековых вариаций геомагнитного поля Камчатки для этого времени. Выявлены периоды быстрой смены направления геомагнитного поля, например, 1.8-2.1 тыс. лет назад. Полученные ре-

зультаты существенно наращивают геомагнитную БД для позднего голоцена Северной Пацифики и могут быть использованы при региональной корреляции позднеголоценовых вулканических событий в Центрально-Камчатской депрессии.

По итогам выполнения большого объема археомагнитных исследований проведены: 1) сравнительное изучение вековых геомагнитных вариаций в Западной Европе и в Западной России для последнего тысячелетия; 2) изучение вековых вариаций геомагнитного поля в Западной и Центральной России между 1600 и 1850 гг. н.э., а также на территории Татарстана для начала второго тысячелетия н.э.; 4) синтез имеющихся и получение новых данных по изменению напряженности геомагнитного поля на Среднем Востоке в позднем неолите; 5) разработка современной археомагнитной БД и построение глобальной модели геомагнитного поля в голоцене. В результате:

1) Показано, что в интервале времени между XII и XVIII вв н.э. на Северо-Западе России отсутствовали сильные и быстрые вариации геомагнитного поля. Эволюция напряженности геомагнитного поля здесь в это время характеризовалась нисходящим трендом, на который накладывается несколько пиков небольшой амплитуды, каждый длительностью около 100 лет;

2) Показано, что значения палеоинтенсивности, определенные по новгородским объектам, систематически меньше таковых, рассчитанных из моделей. Это означает, что современные глобальные модели геомагнитного поля все еще недостаточно точны для того, чтобы предсказывать значения элементов геомагнитного поля регионов слабо покрытых археомагнитными определениями;

3) Получены данные, указывающие на то, что на территории Татарстана между X и XIV вв н.э. существовала крупная геомагнитная аномалия, которая постепенно угасала (уходила) в течение последних нескольких столетий вплоть до XVIII в.;

4) Выполнены детальные исследования ряда археологических памятников Передней Азии. Построены региональные археомагнитные кривые эволюции напряженности геомагнитного поля, которые значительно детализируют представления об эволюции геомагнитного поля VII и VI тысячелетий до н.э. и существенно уточняют археологическую информацию по древнейшим памятникам человеческой цивилизации;

5) Выявлены эпизоды быстрых (десятки – первые сотни лет) вариаций напряженности геомагнитного поля на территории Ближнего Востока. Выявлен и подтвержден пик напряженности геомагнитного поля в этом регионе ~ 5200 лет до н.э.; подтверждена выявленная ранее на сирийских объектах тенденция снижения напряженности геомагнитного поля на протяжении 7-6 тысячелетий до н.э.;

6) Существенно уточнены возрасты разрезов культурных отложений археологических памятников, находящихся на территории современной Сирии (Телль Халула, Телль Мазаикх) и Ирака (Ярым Тепе 2);

7) С опорой на археомагнитные данные, описывающие эволюцию дипольного момента геомагнитного поля в течение последних тысячелетий, показано, что частота солнечных максимумов и минимумов модулируется так называемыми циклами Холстатта с периодом около 2400 лет;

8) На основе изучения статистических характеристик распределения величин палеонапряженности в международной БД показано, что 10-15% определений поля ошибочны. Это связано, скорее всего, с ошибкой идентификации термоостаточной намагниченности, по которой, единственно, возможно корректное определение палеонапряженности. Предложена процедура оценки того, насколько декларированные величины ошибок измерения в рассматриваемых БД соответствуют реально присутствующим в данных неточностям;

9) Изучены точность и устойчивость существующих моделей геомагнитного поля относительно коррекций имеющихся палеомагнитных БД при внесении в них результатов новых измерений. Выявлены недостатки и ограничения имеющейся методологии построения моделей. С учетом этого создан новый, свободный от технологических ограничений и вычислительных ошибок, алгоритм, позволяющий работать с большими объемами данных и варьировать типы спектрального преобразования;

10) Создан и отлажен совершенно новый и быстрый алгоритм определения пространственного спектра магнитного поля по типичным данным архео- и палеомагнетизма, имеющий существенные преимущества по сравнению с предшествующими алгоритмами. При помощи нового алгоритма проведено детальное исследование возможностей построения моделей для голоцена. Выяснены пределы точности таких моделей. Показано, что, за малым исключением, существующие данные не позволяют сколь-либо надежно определять динамику недипольных компонент в голоцене;

11) Выполнен расчет серии рабочих моделей геомагнитного поля голоцена, отвечающих разным модификациям входных данных. Выявлено несколько источников нестабильности моделей, вычисляемых в рамках традиционного подхода. С учетом этих результатов разработаны новые модификации алгоритма, последовательно приближающие к получению корректных оценок точности спектрального преобразования реальных данных. Разработан аппарат, позволяющий оценить влияние свойств используемой БД на точность модели.

Блок 3. Изучение эволюции магнитного поля Земли в фанерозое и докембрии.

Выполнено изучение вековых вариаций геомагнитного поля, записанных в интрузиях сибирских пермо-триасовых траппов. Показано, что амплитуда вековых геомагнитных вариаций на рубеже палеозоя и мезозоя была примерно того же уровня, что и последние 5 млн. лет. При этом выполненный глобальный анализ вековых вариаций, записанных в разновозрастных вулканических толщах фанерозоя, в целом, указывает на то, что их наблюдаемые амплитуды не совместимы ни с одной из ранее предлагавшихся моделей и, по-видимому, не коррелируют с частотой геомагнитных инверсий.

Показано, что удлинение распределений палеомагнитных направлений, предлагавшееся ранее для описания поведения поля, не являются статистически устойчивой величиной при реально достижимых объемах коллекций.

Установлено, что геомагнитное поле во время позднепалеозойского каменноугольно-пермского суперхрона Киамы характеризовалось высокой степенью дипольности и низкой амплитудой вековых геомагнитных вариаций.

Модифицирована и существенно дополнена международная БД по палеонапряжённости (http://www.brk.adm.yar.ru/palmag/index_e.html). Показано, что с большой степенью вероятности в периоды низкого поля, существовавшие в отдельные периоды протерозоя и в девоне, геомагнитное поле носило выраженный мультипольный характер.

По палеопротерозойским породам Южной Африки выполнены определения напряженности геомагнитного поля времени образования этих пород (1850 млн. лет назад). Показано, что в это время средняя величина напряженности поля была почти втрое меньше его средней величины в кайнозой. Это обстоятельство, в совокупности с другими литературными данными по палеонапряжённости и частоте инверсий в протерозое, может рассматриваться как довод в пользу гипотезы о позднем возникновении твёрдого внутреннего ядра Земли, поскольку в его отсутствие, согласно существующим представлениям в теории геодинамо, эффективность генерации геомагнитного поля должна быть относительно невелика.

С другой стороны, на вулканических образцах Карелии возраста 2505 млн. лет методом Телье получены новые данные о величине палеонапряжённости на границе архея и протерозоя, удовлетворяющие современным требованиям надёжности и указывающие на существование в это время необычайно сильного геомагнитного поля, превышающего его современное значение примерно в полтора раза.

Эти новые данные, наряду с уже опубликованными результатами показывают, что напряженность геомагнитного поля в протерозое изменялась немонотонно и, в настоящее

время, эволюция этого параметра не может быть напрямую связана с возникновением и ростом внутреннего ядра Земли.

Получены магнитостратиграфические данные, указывающие на аномально высокую частоту инверсионного процесса вблизи границы докембрия и палеозоя, отражающую гиперактивное состояние геомагнитного поля в это время.

Выполнено детальное исследование магнитной стратиграфии мезо-неопротерозойского уровня опорного разреза рифея Туруханского поднятия. Получено доказательство существования геомагнитного суперхрона (суперхрон Мая) на границе мезо- и неопротерозоя, оценена его длительность. Получены новые данные о существовании в протерозое резких переходов между инверсионным и суперхронным режимами функционирования геодинамо.

Для описания эволюции инверсионного процесса предложена модель, которая предполагает существование трех рабочих режимов в инверсионном процессе, а именно: 1) нормального инверсионного режима, в течение которого распределение геомагнитных инверсий описывается случайным стационарным процессом с частотой инверсий порядка 3 инверсий за 1 млн лет; 2) неинверсионного “суперхронного” режима, для которого свойственно существование длительных интервалов времени без инверсий; 3) гиперактивного инверсионного режима, характеризующегося крайне высокой частотой геомагнитных инверсий. Модель также предполагает, что переход от одного режима работы геодинамо к другому может совершаться внезапно (в масштабах первых миллионов лет), при этом вероятность перехода от одного режима к другому может напрямую зависеть от характера распределения теплового потока на границе ядро–мантия. При этом до формирования внутреннего ядра в докембрии такие переходы могли быть более частыми из-за более сильного влияния термальных условий на границе ядро–мантия на работу геодинамо.

Создана палеомагнитная БД по пограничным пермо-триасовым осадочным породам и магматическим комплексам Восточно-Европейской платформы (ВЕР) и «стабильной Европы» для интервала времени 260-245 млн. лет.

Выполнены детальные магнитостратиграфические исследования ряда опорных разрезов Южной Франции, Центральной Германии, Нижегородской, Оренбургской и Вологодской областей России. Получены новые позднепермские-раннетриасовые палеомагнитные полюсы ВЕР и «стабильной Европы», которые существенно дополняют созданную БД.

Выполнен анализ этих данных, который показал, что вклад зональных недипольных компонент в геомагнитное поле на границе палеозоя-мезозоя суммарно составлял не более 10%.

Разработаны или уточнены магнитостратиграфические схемы пермо-триасовых отложений южной Франции, центральной Германии, Среднего Поволжья, Оренбургской области, бассейна Северной Двины.

Блок 4. Изучение геодинамической эволюции Северной Евразии в позднем докембрии и фанерозое.

Для верхов верхнего рифея получены новые палеомагнитные полюсы, которые существенно уточняют характер дрейфа Сибирской платформы (СП) в конце докембрия.

Предложены две альтернативные модели неопротерозойского сегмента сибирской кривой кажущейся миграции полюса (КМП). Получены новые ограничения на конфигурацию суперконтинента Родиния и на взаимное положение СП и Лаврентии в интервале 900-750 млн.лет

На основе палеомагнитных данных подтверждена корреляция основных опорных разрезов рифея СП (Семихатов, Серебряков, 1983).

По верхнему венду Южного Урала и СП получены новые палеомагнитные полюсы, позволяющие реконструировать палеогеографическое положение ВЕП и СП вблизи границы докембрия и фанерозоя, сделать новый важный шаг в разработке кривых КМП для этих кратонов.

По вулканическим и осадочным породам позднего палеозоя Урала и Казахстана получены новые палеомагнитные данные, которые заставляют: 1) пересмотреть взгляды на эволюцию магматизма в западной части Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП); 2) предположить, что формирование эпипалеозойского Уральского орогена происходило без заметного сближения ВЕП и Казахстана.

На основе синтеза палеомагнитных, геохронологических, геохимических, седиментологических и палеонтологических данных по рифею, венду и нижнему палеозою Южного Урала, Мезенского бассейна и севера Енисейского края (ЕК) разработаны модернизированные модели строения и тектонического развития этих регионов в позднем докембрии – начале фанерозоя. В частности, ключевым моментом модели строения и эволюции позднедокембрийско-раннепалеозойской эволюции для ЕК является произошедшее в конце венда осложнение крупно-амплитудно продольными сдвиговыми дислокациями позднедокембрийской пассивной западной окраины СП. Комплексное изучение верхнего докембрия Восточно-Ангарской и Центрально-Ангарской структурных зон ЕК позволило сделать вывод о сходстве многих элементов строения этих зон, и о том, что Центрально-Ангарская зона автохтонна (параавтохтонна) по отношению к СП.

Изучен весь позднепротерозойский осадочный разрез Байкало-Патомской складчатой области, а также исследованы ключевые объекты Байкало-Муйского пояса. Выделены и датированы детритовые цирконы, что позволило, с одной стороны, ограничить возраст палеонтологически «немых» толщ, а с другой – определить вероятные источники сноса для разных элементов изученного разреза. Выполнена обработка палеомагнитных коллекций позднего докембрия и палеозоя Байкало-Патомской области и на этой основе даны ограничения на палеогеографическое положение Байкало-Патомской области (и СП в целом) в позднем неопротерозое и позднем палеозое. Все это позволило получить серьезные изотопные, палеогеографические, палеотектонические ограничения на историю формирования Байкало-Патомской области и разработать современную модель, описывающую тектоническую эволюцию региона в интервале времени 800-300 млн. лет назад.

Выполнено палеомагнитное тестирование гипотезы Шенгера-Буртмана-Наталина (1993), описывающей формирование ЦАСП. Показано, что имеющиеся палеомагнитные определения по СП и ВЕП допускают, что эти континентальные блоки в конце докембрия – самом начале палеозоя могли быть обращены друг к другу своими современными северными окраинами, что хорошо согласуется с базовыми положениями тестируемой гипотезы.

Таким образом, все задачи, поставленные перед Проектом на 2014-2016 гг., успешно решены. Часть результатов, полученных в ходе выполнения Проекта, опубликована в ведущих отечественных и международных журналах, представлена участниками Проекта в многочисленных докладах на научных отечественных и международных конференциях. Другая часть в настоящее время готовится к печати. Полученные результаты в совокупности представляют собой значительный шаг на пути изучения эволюции магнитного поля Земли и истории геологического развития Северной Евразии и планеты в целом.

Ключевые слова: Археомagnetизм, глобальные геомагнитные модели, палеомагнетизм, магнитостратиграфия, эволюция геомагнитного поля, палеовековые вариации, напряженность геомагнитного поля, частота геомагнитных инверсий, суперхрон, геодинамика, Сибирская платформа, Восточно-Европейская платформа, венд, протерозой.

Введение.

Магнитное поле – одна из фундаментальных характеристик нашей планеты, изучение геомагнитного поля как физического феномена (в том числе в аспекте его исторического развития) является важным направлением познания окружающего мира. Восстановление эволюции магнитного поля Земли необходимо для разработки физической теории геомагнетизма, для изучения процессов, проходящих во всех планетарных оболочках Земли от внутреннего ядра до магнитосферы, для установления их связи с важнейшими событиями геологической истории. Изучение древнего геомагнитного поля дает основу для решения многочисленных фундаментальных и прикладных задач наук о Земле – стратиграфии, палеогеографии, геохронологии, тектоники и проч. Современная теория о тектонике плит своим возникновением, в значительной степени, обязана палеомагнитным данным. Изучение эволюции геомагнитного поля необходимо для понимания его связи с изменениями окружающей среды (в том числе, климата), для получения адекватного представления о таких изменениях в прошлом и для их прогнозирования в будущем.

Несмотря на бурное развитие палеомагнитологии в последние десятилетия, до сих пор не получено ответов на многие ключевые вопросы, касающиеся эволюции магнитного поля Земли. Существует четыре основных параметра, по которым можно судить об эволюции геомагнитного поля: (1) напряженность геомагнитного поля, (2) частота геомагнитных инверсий, (3) амплитуда вековых геомагнитных вариаций и (4) геометрия поля. В рамках настоящего Проекта выполнен широкий круг исследований по изучению значений и эволюции всех этих четырех параметров на протяжении значительной части геологической истории нашей планеты.

В силу специфики объектов и методов исследований внутри палеомагнитологии как науки выделяется особое направление – археомагнетизм, занимающееся детальным изучением истории геомагнитного поля последних тысячелетий. Возрождению археомагнетизма в России, созданию современной, активно работающей археомагнитной лаборатории мирового уровня была посвящена значительная часть работ, проведенных в рамках этого Проекта.

Проект состоит из нескольких частей, каждая из которых связана с изучением эволюции геомагнитного поля в различных временных масштабах. Наиболее важные из них следующие:

1) Изучение геомагнитного поля голоцена.

Вековые вариации геомагнитного поля отражают магнито-гидродинамические процессы, происходящие во внешнем ядре, состоящем, главным образом из жидкого железа, на глубинах между приблизительно 2900 и 5150 км. Нерегулярные в пространстве и во времени, эти вариации включают эволюцию как дипольной, так и недипольной частей геомагнитного поля, которые составляют, соответственно, почти 90% и 10% суммарного поля, наблюдаемого на земной поверхности. Геомагнитные вековые вариации относительно хорошо изучены для последних 2-3 столетий, благодаря прямым наблюдениям. Эти наблюдения относительно равномерно покрывают земную поверхность, позволяя достаточно детально отслеживать эволюцию магнитного поля. Для изучения временных изменений геомагнитного поля в более древние эпохи возможно использовать только косвенные определения, основанные на изучении палеомагнитных записей, содержащихся в горных породах и в археологических объектах.

Большие успехи, достигнутые в последние годы в этом направлении, связаны с разработкой математических моделей геомагнитного поля последних нескольких тысячелетий (напр. [Korte et al., 2009; Licht et al., 2013]). Однако, несмотря на значительный прогресс в деле изучения геомагнитного поля последних тысячелетий, точность и надежность моделей остаются все еще недостаточными из-за довольно неравномерного распределения имеющихся данных по поверхности планеты. Особо неблагоприятное влияние это обстоятельство оказывает на определение недипольных компонент геомагнитного поля. Получение новых данных по территории России внесет значительный вклад в международные усилия, прилагаемые в настоящее время для расширения и повышения качества имеющихся палео- и археомагнитных баз данных. Важной отличительной чертой настоящего проекта является комбинация археомагнитных исследований с исследованиями голоценового геомагнитного поля, записанного в озерных донных отложениях и в голоценовых вулканических потоках. Сравнение данных, полученных из различных удаленных друг от друга регионов с уже имеющимися европейскими данными, позволяет извлечь новую уникальную информацию о голоценовой эволюции недипольного поля на территории Северной Евразии. В ходе выполнения проекта особое внимание было уделено обнаружению быстрых вариаций геомагнитного поля, таких как археомагнитные джерки и геомагнитные спайки [Gallet et al., 2003; Shaar et al., 2011]. Понимание природы этих активно обсуждаемых геомагнитных феноменов требует получения новых данных. Поскольку археомагнитные джерки могут иметь заметное влияние на атмосферные процессы, их фиксация и изучение важны не только для геомагнетизма, но и для изучения климата и окружающей среды.

Формирование русской археомагнитной школы началось со стажировки, которую проходила С.П. Бурлацкая в начале 60-х годов в лаборатории Е. Телье, расположенной в Сен-Море, недалеко от Парижа. После возвращения в Россию, С.П. Бурлацкая основала археомагнитную лабораторию, которая, после присоединения к ней К.С. Буракова и И.Е. Начасовой, стала сильнейшей археомагнитной лабораторией на территории Советского Союза и других социалистических стран. Методичная работа этой лаборатории на протяжении нескольких десятилетий привела к созданию высококачественных опорных региональных археомагнитных кривых для ряда регионов, в частности для Средней Азии и Кавказа.

В то же время, в связи с имевшей место частичной изоляцией советских исследований от мирового научного сообщества, протокол исследований с годами все более и более отличался, а часть результатов оставалась недостаточно апробирована. Имевшие место экономические трудности и отсутствие притока молодых кадров привело к уменьшению интенсивности археомагнитных исследований в России, которые практически полностью прекратились со смертью К.С. Буракова. Сегодня мы можем уверенно утверждать, что успешная реализация настоящего Проекта привела к возрождению археомагнетизма в России.

2) Изучение долговременных изменений в частоте геомагнитных инверсий.

Эта часть Проекта была направлена на определение характера изменений частоты геомагнитных инверсий в течение геологического времени, главным образом в позднем протерозое и раннем палеозое. При этом главное внимание в ходе этих исследований уделялось суперхронам и периодам с частыми геомагнитными инверсиями. Наша цель – лучше понять происхождение сильных вариаций в частоте геомагнитных инверсий. Отметим, что эта тема была и остается предметом острого интереса со стороны многих исследователей, работающих в науках о Земле напр. [Biggin et al., 2008, 2012; Aubert et al., 2009; Driscoll and Olson, 2009; 2011].

Магнитостратиграфические исследования ряда нижнепалеозойских разрезов Сибирской платформы прежних лет позволили нам сделать вывод о существовании третьего фанерозойского суперхрона – Ордовикского суперхрона обратной полярности и получить ограничения на частоту инверсий в предшествующий ему интервал времени - в среднем и позднем кембрии [Gallet and Pavlov, 1996; Pavlov and Gallet, 1998, 2005]. Было показано, что средний кембрий характеризовался очень высокой, возможно, наибольшей для фанерозоя, частотой инверсий, составлявшей 6-8 инверсий за 1 млн. лет [Pavlov and Gallet, 2001; Gallet et al., 2003]. В ходе настоящего Проекта особое внимание было уделено рабо-

там на докембрийских объектах мезо- и неопротерозойского возраста, поскольку, с одной стороны, число магнитостратиграфических данных для соответствующих интервалов времени крайне ограничено, с другой стороны, имеется довольно большое количество перспективных для изучения объектов этого возраста, и, с третьей стороны, потому что, только изучая и сравнивая отдаленные эпохи, возможно уверенно зафиксировать долго-временные изменения.

Принимая во внимание все полученные нами и нашими коллегами данные, мы предложили сценарий, согласно которому доля времени, когда геодинамо находилось в “суперхронном” состоянии, постепенно уменьшалось в течение протерозоя. При этом уменьшалась также и частота инверсий между суперхронами [Gallet et al., 2012]. Эти изменения, таким образом, идут в направлении сглаживания крайностей, приводя к уменьшению числа суперхронов и частоты инверсий между ними. Этот процесс может отражать постепенное уменьшение влияния на геодинамо тепловых условий на границе ядра-мантии, возможно, в связи с уменьшением общего теплового потока через эту границу. С другой стороны, очень заманчиво связать наблюдаемую нами тенденцию с формированием внутреннего ядра Земли, которое, согласно ряду моделей [Aubert et al, 2009; Olson et al., 2013] могло произойти относительно поздно (<1 млрд.лет назад) в земной истории.

Исследования, которые мы провели в ходе настоящего Проекта, позволили нам получить новые важные данные для решения следующих вопросов:

(1) Наблюдаются ли на других интервалах докембрия периоды частых инверсий и суперхроны? (2) Характеризуются ли периоды частых инверсий и суперхроны резкими переходами? (3) Поддерживают ли дальнейшие наблюдения модель эволюции инверсионного процесса, предложенную Галле с соавторами [Gallet et al., 2012]? (4) Можно ли найти дополнительные доказательства того, что наблюдаемая эволюция инверсионного процесса связана с формированием внутреннего ядра Земли? (5) Существовали ли (например, на границе докембрия и кембрия) длительные (до миллионов лет) периоды нестабильного поля или периоды быстрых изменений поля? (6) И если так, то могут ли эти периоды быть связаны с эпизодами истинного смещения полюса, которые, согласно [Kirschvink et al., 1997] могли радикально изменить климат, карбоновый цикл, атмосферную циркуляцию и т.п. и, таким образом, быть толчком к раннекембрийскому “взрыву жизни”?

3) Палеогеографические реконструкции Сибири, Балтики и прилегающих районов

Настоящий Проект посвящен, главным образом, изучению эволюции магнитного поля Земли на различных масштабах времени. Однако, палеомагнитные данные, которые были получены в ходе его выполнения, также исключительно важны для решения много-

численных актуальных вопросов геодинамической эволюции Северной Евразии, формирующих ее древних стабильных блоков и обрамляющих их подвижных складчатых поясов. Полученные данные имеют большое значение для построения и развития траекторий кажущейся миграции полюса (КМП) для Сибирской и Восточно-Европейской (Балтики) платформ для позднего докембрия и фанерозоя, что крайне существенно, в частности, для изучения палеогеографической и палеотектонической истории суперконтинента Родиния, уточнения его конфигурации, определения временных границ его формирования и распада. Другим важным приложением полученных палеомагнитных данных является расшифровка тектонической истории Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП). В частности, в ходе Проекта было выполнено тестирование гипотезы Шенгера-Натальина-Буртмана [Sengör et al., 1993], описывающей происхождение этого пояса, а также, получены серьезные ограничения на тектоническую историю его Байкало-Патомской части.

В ходе выполненных работ была выполнена широкая программа изучения палеоинтенсивности, вариаций и геометрии геомагнитного поля на различных временных срезах.

Основными целями Проекта были: (1) создание современной археомагнитной лаборатории мирового класса; (2) получение новых ключевых данных об эволюции магнитного поля Земли на разных масштабах времени: от сотен до сотен миллионов лет; (3) использование этих данных для изучения связи процессов, происходящих во внутренних и внешних оболочках нашей планеты.

Для достижения этих целей для каждого года работ были сформулированы конкретные задачи, общим число 42, которые можно объединить в следующие блоки, отвечающие глобальным задачам Проекта: Блок 1: Создание новой лабораторной инфраструктуры и разработка новых методов; Блок 2: Построение опорных кривых палеовековых вариаций геомагнитного поля для различных регионов России и разработка глобальной модели магнитного поля голоцена; Блок 3. Изучение эволюции магнитного поля Земли в фанерозое и докембрии. Блок 4. Изучение геодинамической эволюции Северной Евразии в фанерозое и позднем докембрии.

Ниже изложены основные результаты, полученные в ходе исследований, выполненных в рамках настоящего Проекта.

Блок 1: Создание новой лабораторной инфраструктуры и разработка новых методов.

Создана современная археомагнитная лаборатория, оборудованная передовой аппаратурой, позволяющей выполнять высокоточные исследования археологических артефактов и определять по ним напряженность древнего геомагнитного поля. Из молодых сотрудников Лаборатории подготовлен персонал, владеющий передовыми методами археомагнитных исследований и обладающий собственным (приобретенным в ходе выполнения Проекта) опытом решения археомагнитных задач.

1.1. Технические средства лаборатории.

Лаборатория практически полностью укомплектована современными измерительными и вспомогательными приборами и оборудованием, необходимыми для выполнения на мировом уровне архео-, петро- и палеомагнитных исследований.

На средства мегагранта приобретена, установлена (рис.1.1.1., 1.1.2.Е,Ж), запущена в работу и активно эксплуатируется **система MicroMag™ 3900 Series Vibrating Sample Magnetometer (VSM)** производства Princeton Measurements Corporation (США), позволяющая с высокой точностью и высокой производительностью выполнять широкий спектр петромагнитных измерений, часть из которых (например, снятие FORC-диаграмм) доступна только при использовании этого прибора. Важно отметить, что прибор обладает конфигурацией, предусматривающей возможность последовательного наращивания его функциональных возможностей.

На средства мегагранта приобретены и запущены в работу также:

Терморазмагничивающая установка ММТД-24 (Англия, рис. 1.1.2.Г), характеристики которой позволяют выполнять на высоком уровне эксперименты по методу Телле, являющемуся в настоящее время основным методом, используемым при определении напряженности древнего геомагнитного поля;

Каппабридж МFK1-FA с криостатом (рис. 1.1.2.Д) для снятия температурных зависимостей восприимчивости при низких температурах (от -196°С до комнатной). Этот прибор необходим для диагностики минералов-носителей намагниченности и для получения ограничений на время формирования компонент естественной остаточной намагниченности;

3D-Rotator, приставка для каппа-моста МFK1-FA (AGICO), которая позволяет

автоматически измерять анизотропию магнитной восприимчивости образцов горных пород.

Термостабилизатор рефрижераторного типа (чиллер) HRS050-AF-20 производства SMC (Япония). Этот агрегат обеспечивает независимое от внешних сетей и безопасное охлаждение систем работающих приборов (таких, как VSM, термомагнитометр, вибромагнитометр и др.)

Агатовая механическая ступка для подготовки (измельчения) образцов к измерениям. Этот прибор необходим для перехода от ручной пробоподготовки образцов к механической, что существенно повышает производительность работ, позволяет персоналу уделять большее время непосредственно научным исследованиям.

Сверлильный станок для подготовки образцов для исследования на Triax magnetometer.

Современная модификация XY- столика (производство 2G Enterprises, рис. 1.1.2.Б). Закупка этого оборудования позволила существенно увеличить производительность автоматических измерений остаточной намагниченности образцов на измерительном комплексе “Храмов-Палеомаг”.

Для установки этого и другого оборудования Институтом Физики Земли выделен ряд помещений общей площадью более 70 м², где в настоящее время оборудована комплексная архео-, палео- и петромагнитная лаборатория. Выполнен ремонт специальной комнаты для пробоподготовки. В помещениях установлено необходимое вентиляционное и термостатирующее оборудование.

В настоящее время аппаратный парк лаборатории включает около 20 наименований различных магнитометрических и вспомогательных приборов, при общем числе их более 40.



Рис. 1.1.1.

Вибромагнитометр MicroMag модель 3900-04 VSM system производства американской фирмы Lake Shore Cryotronics, установленный в помещении лаборатории Археомagnetизма



А

Б

В,Г

Д,Е

Ж

Рисунок 1.1.2. Техническая оснащенность лаборатории

В значительной степени благодаря мегагранту произошло существенное обновление аппаратного парка лаборатории. В результате, по своим техническим возможностям созданная лаборатория отвечает всем мировым требованиям, а после установки и запуска трехосного магнитометра “Triaxe”, которые планируется осуществить в 2017 г., лаборатория войдет в число лучших археомagnetных лабораторий мира.

1.2. Разработка программного обеспечения.

Для обеспечения работ по Проекту был создан ряд компьютерных программ, наиболее важные из которых описаны ниже.

1.2.1. Программа разложения коэрцитивных спектров.

Для измерительной системы MicroMag™ 3900 Series Vibrating Sample Magnetometer (VSM) разработана специальная компьютерная программа, в которой на основе специального математического алгоритма, основанного на технике неотрицательной матричной факторизации, реализована возможность выполнять разложения коэрцитивных спектров с целью выделения основных носителей намагниченности в осадочных разрезах, донных колонках озерных и океанических отложений (см. также раздел “Разработка методов исследований”).

Программа позволяет в считанные минуты выполнить полный анализ коэрцитивных спектров для сотен и тысяч образцов с надёжным выделением основных носителей намагниченности в осадочных разрезах, донных колонках озерных и океанических отложений. В результате появляется возможность проследить вариации содержания и свойств носителей намагниченности в разрезах на протяжении времени их формирования, с последующей их интерпретацией в терминах палеоклиматологии и палеоэкологии.

1.2.2. Программа для обеспечения работы многофункционального палеомагнитного измерительного комплекса “Храмов-Палеомаг”.

На основе модернизации программного кода и интерфейса программы Paleomag-2013 разработана усовершенствованная программа, позволяющая с учетом конструктивных особенностей измерительного комплекса “Храмов - Палеомаг” через единый интерфейс выполнять комплексные палеомагнитные измерения (рис. 1.2.2.).

Необходимость этих работ определялась тем фактом, что исходное программное обеспечение для установленного измерительного комплекса было разработано в Калифорнийском технологическом институте (США) для решения довольно узкого спектра задач конкретной лаборатории, что существенно затрудняло или и вовсе делало невозможным его использование для решения ряда задач как археомagnetизма, так и палео- и петромагнетизма. Поэтому весьма актуальной являлась задача разработки собственного программного обеспечения, удовлетворяющего внутренним требованиям как с точки зрения упрощения алгоритма проведения магнитных измерений, повышения надежности и

расширения спектра решаемых при помощи данного оборудования задач, так и в плане работы с форматами данных.

Перед исполнителями Проекта стояла задача разработки программного обеспечения, предназначенного для управления измерительным комплексом на базе криогенного магнитометра и учитывающим требования для решения задач архео-, палео- и петромагнетизма. При этом решались следующие задачи: (1) разработка и отладка программных модулей, отвечающих за обмен данными и управление отдельными блоками измерительного комплекса: магнитометром, роботизированной системой подачи образцов, каппабриджем, установкой для размагничивания переменным полем, установкой для создания идеальной и нормальной намагниченности; (2) разработка и тестирование "user-friendly" интерфейса, доступного для пользователя с минимальной начальной подготовкой; (3) создание программного обеспечения для безбарьерного использования файлов палеомагнитных данных разных форматов; (4) создание соответствующей технической документации и инструкций для конечного пользователя; (5) обеспечение доступа к программам и документации посредством сети Интернет.

Все эти задачи решены в ходе реализации Проекта. В результате выполненных работ отлажен, дополнен и существенно доработан программный код стандартной версии программы-интерфейса криогенного магнитометра 2G Enterprises, существенно повышена стабильность и надежность работы палеомагнитного измерительного комплекса «Храмов-Палеомаг», расширены его измерительные возможности. Создана техническая документация на русском языке и разработаны пошаговые инструкции для проведения серии стандартных магнитных экспериментов на измерительном комплексе.

Разработано и реализовано в коде программное обеспечение для двухстороннего конвертирования файлов хранения палеомагнитных данных разных стандартов (2G, pmd, dat, rs3). Для данного программного обеспечения создана серия инструкций, ориентированная на конечного пользователя.

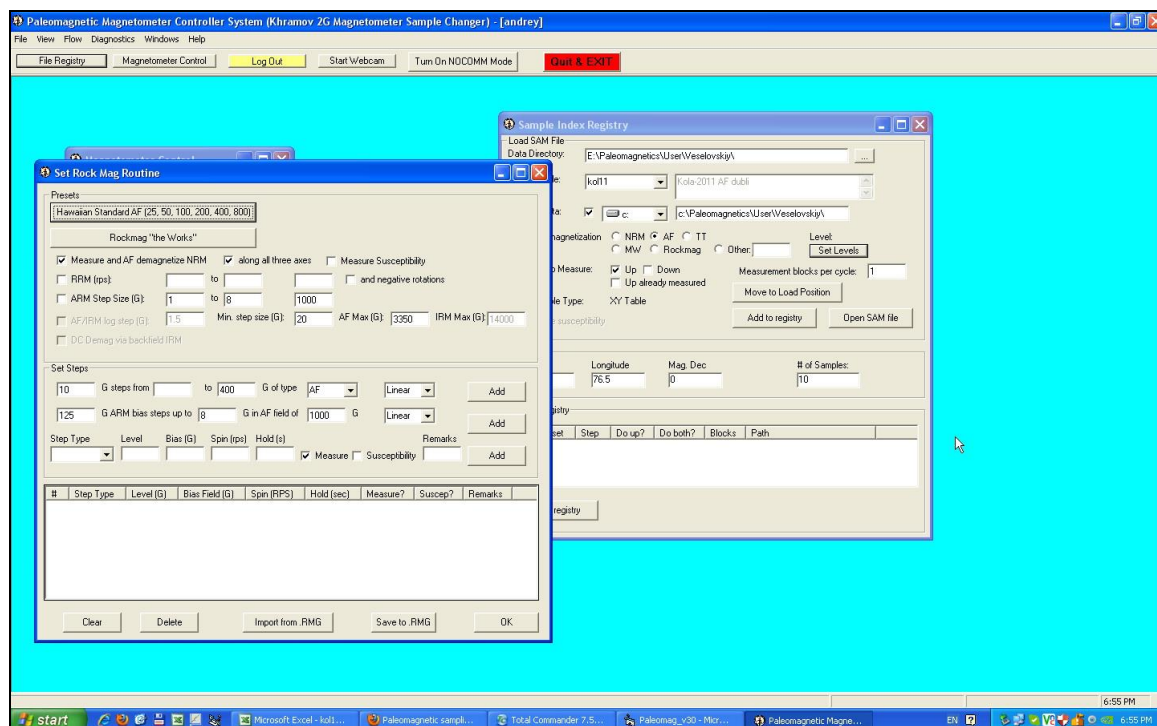


Рисунок 1.2.2. Пример сложно построенного экранного интерфейса программы-интерфейса “Paleomag” многофункционального измерительного комплекса «Храмов - Палеомаг».

1.2.3. Разработка алгоритма и компьютерной программы, генерирующей распределения палеомагнитных направлений для модели геомагнитного поля с заданным набором членов сферического гармонического разложения

Разработан оригинальный алгоритм, позволяющий генерировать распределения и временные последовательности палеомагнитных направлений для заданных моделей геомагнитного поля с заданным набором членов сферического гармонического разложения. На основе этого алгоритма создана компьютерная программа под Windows и инструкция по ее использованию для широкого круга пользователей, работающих в области геомагнетизма.

Одним из важнейших параметров, описывающих эволюцию геомагнитного поля, является характер его вековых вариаций и их изменения в пространстве и во времени.

Реальные данные не позволяют создать целостную картину вековых вариации геомагнитного поля, поскольку пространственно-временное распределение данных очень не-

равномерно. С другой стороны, обладая моделью поведения поля в глобальном масштабе, можно детализировать поведение поля применительно к конкретному набору характеристик в одной или нескольких географических точках на выбранном интервале времени. Это дает дополнительный инструмент для анализа реальных данных относительно известных теоретических описаний.

Простой пример использования моделирования заключается в следующем: при анализе палеомагнитных данных по вулканитам в первую очередь интересно разделить ошибки измерения и влияние вековых вариаций собственно магнитного поля. С точки зрения решения обратной задачи сделать это достаточно сложно. Следовательно, весьма важен эвристический метод оценки положения, занимаемого измеренными данными по отношению к вариациям дипольной и недипольных компонент, а также к вариациям возможной ошибки измерений. При этом оказывается, что форма рассеяния в каждом из перечисленных случаев разная и по этой форме в ряде случаев можно отличить вклад ошибок измерения от вклада вековых вариаций. В этом простом примере речь идет о генерации некоторого числа независимых данных с предписанными дипольными и недипольными компонентами.

Чуть более сложный пример применения возникает, когда речь идет о палеомагнитных данных по осадкам, то есть тогда, когда существенны корреляции во времени: здесь речь идет уже о генерации временных рядов коэффициентов спектрального разложения поля с предписанными корреляционными масштабами.

Указанные простейшие примеры служат достаточным обоснованием утилитарной полезности инструмента, позволяющего генерировать синтетические геомагнитные данные с предписанным характером изменчивости в пространстве и времени.

Пространственное поведение определяется коэффициентами спектрального разложения поля по сферическим гармоникам в каждый момент времени, а эволюция поля во времени определена предписанными корреляционными свойствами коэффициентов как временных рядов. Соответствующий подход описан в литературе примерно пятнадцать лет назад Констебелем и Паркером, все это время ведутся поиски наилучшей модели для каждого из известных периодов стабильной полярности.

При создании программного продукта, расчет делался на широкий круг исследователей. Поэтому, мы исходили из минимума общего знания предмета и не расширяли ни терминологию, ни круг технических средств, которые могли бы оказаться непривычными или недоступными с точки зрения практикующего геофизика. Для этого был выбран следующий простой подход, подразумевающий, что все входные данные (параметры моделей), с одной стороны, находятся полностью под контролем пользователя и легко могут

быть изменены путем использования любого простейшего текстового редактора. С другой стороны, пользователю всегда доступен некий образец заполнения массивов входных параметров, который на сегодняшний день является в некотором смысле наилучшим, то есть соответствующая модель вековых вариаций удовлетворительно описывает все доступные на сегодня данные эпохи текущей стабильной полярности Брюнес.

В ходе выполнения работ по Проекту нами был написан программный код, который может быть скомпилирован в приложение, работающее под любой из трех наиболее распространенных операционных систем. При этом, во избежание использования системно-ориентированных математических библиотек был выбран вариант стандартного расширения **BOOST** библиотеки классов C++ – то есть задача мультиплатформенности полностью сведена к поддерживаемой международным стандартом мультиплатформенности языка C++.

Созданная программа предназначена для симуляции данных (палео)магнитного поля в наборе географических точек на поверхности Земли в предположении, что наблюдения в этих точках ведутся с постоянным шагом по времени в масштабах тысячелетий. При этом используется набор параметров поля, который определяется самим пользователем и формируется в виде нескольких файлов базового текстового формата, в частности имеющих расширение имени **txt**. Параметры описывают спектрально-временные характеристики поля, при этом каждая спектральная характеристика считается статистически независимой от остальных реализацией стационарного гауссова процесса с некоторой (также задаваемой пользователем) автокорреляцией.

Для того, чтобы задать модель вариаций (которую в соответствии с традицией следует называть **GGP**-моделью от английского сокращения Giant Gaussian Process), надо указать данные о *математических ожиданиях* каждого из коэффициентов $g_n^m(t)$, $h_n^m(t)$ в пространственном спектральном разложении поля; данные о *стандартных отклонениях* каждого из коэффициентов $g_n^m(t)$, $h_n^m(t)$ в пространственном спектральном разложении поля; данные о *масштабах автокорреляционной функции* каждого из коэффициентов $g_n^m(t)$, $h_n^m(t)$, при этом форма автокорреляционной функции выбирается единообразно для всех коэффициентов; степень модели, размер и количество отсчетов по времени.

Отметим, что текущая версия программы консольная и может быть перекомпилирована под любую операционную систему. Но такая мультиплатформенность накладывает следующие **ограничения на ввод данных**:

- Все файлы данных находятся в одной директории с исполняемой программой.
- Все имена файлов не содержат пробелов и специальных символов.

- Все файлы текстовые и не содержат символов специального дополнительного

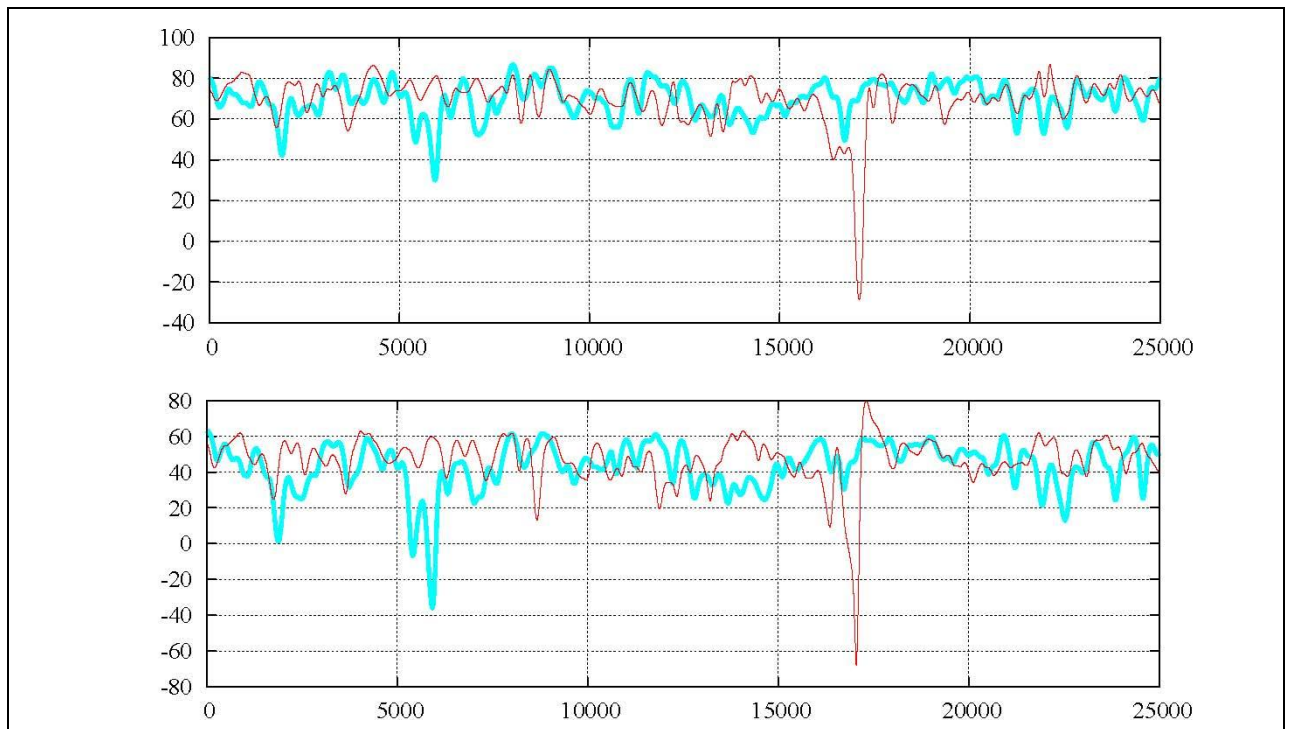


Рисунок 1.2.3.1. Моделирование эволюции наклонения (в градусах) за 25000 лет в моделях ТК (тонкая линия) и QC (жирная линия) для 30° N (нижний график) и 60° N (верхний график)

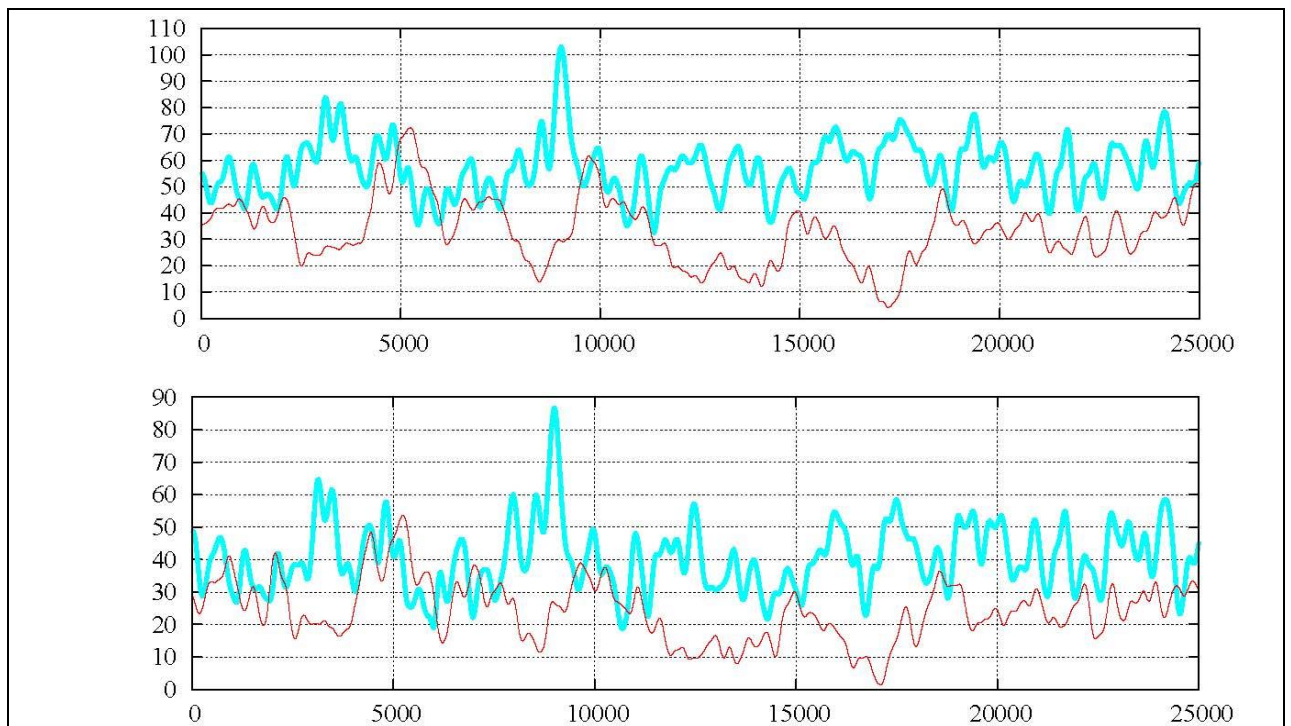


Рисунок 1.2.3.2. Моделирование эволюции интенсивности (в микротеслах) за 25000 лет в моделях ТК (тонкая линия) и QC (жирная линия) для 30° N (нижний график) и 60° N (верхний график)

60° N (верхний график).

- форматирования.

Результаты моделирования выдаются в текстовый файл, который для удобства согласован с форматом Excel

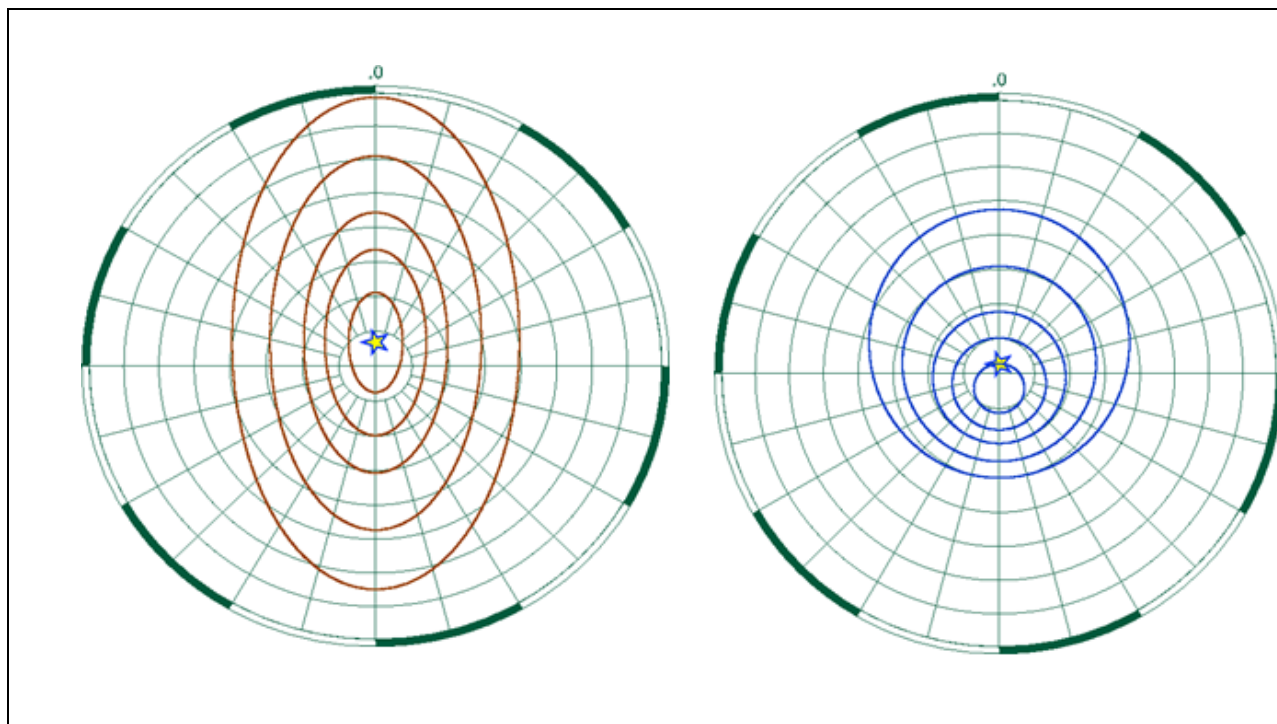


Рисунок 1.2.3.3. Форма изолиний плотности распределения направлений, отвечающих областям вероятности 10%, 30%, 50%, 70% и 90% в модели QC для географических точек экватора (слева) и 45°N (справа). Напомним, что формы рассеяния направлений в этой модели не зависят от долготы. Используются проекции Ламберта локальных направлений на плоскость, центрированные на соответствующие чисто дипольные направления, звездочками отмечены направления среднего поля по модели QC, грид сетки 5°x15°, ориентация задана тем, что часть дуги большого круга, определенного направлением чистого диполя и направлением на Север, отвечает вертикальному отрезку.

Первая версия программы предлагается для свободного распространения среди исследователей в области геомагнетизма, ее можно бесплатно копировать и изменять в рамках, оговоренных GNU General Public License и опубликованных Free Software Foundation в версии 2, или более поздней. Время собственно работы программы весьма мало (в большинстве практически интересных случаев это первые секунды), поэтому в дальнейшем мы предполагаем сделать интернет-версию программы, так чтобы запускать ее и получать результаты можно было бы непосредственно с web-страницы лаборатории.

Дополнение 1: пример синтезирования поведения магнитного поля во времени.

В качестве поясняющего примера рассмотрим охватывающие 25 тысяч лет случайные реализации моделей Кидлера и Куртильо QC (1998) и Токс и Кент ТК (см. [Tauхе and Kent, 2004]) с шагом разрешения по времени 5 лет и построим для этих двух реализаций картинки эволюции во времени наклонения I (рис. 1.2.3.1.) и интенсивности F (рис. 1.2.3.2.) на разных широтах (показаны 30°N и 60°N). Интересно, что, несмотря на стационарный характер моделей, в рассматриваемых параметрах мы наблюдаем, например, экскурсы, которые традиционно принято соотносить с проявлениями нестационарности; видна также некоторая разница в поведении, определяемая несовпадением параметров этих моделей.

Дополнение 2: пример синтеза выборки независимых данных.

Как уже говорилось во введении, часто на практике возникает следующая задача: проверить положение конкретного измеренного значения, скажем магнитного наклонения, при варьировании дипольного, квадрупольного или каких-то иных спектральных параметров. При этом, результатом варьирования предполагается выборка статистически независимых значений наклонения. В терминах программы это означает, что надо установить требуемые значения средних и стандартных отклонений для используемых варьируемых параметров. Для фиксируемых параметров следует назначить стандартные отклонения нулевыми, а все характеристические времена выбрать также нулевыми. Тогда, при вычислении изменений поля с некоторым (неважно каким) шагом по времени, "эволюция" синтезированного наклонения и даст искомую выборку. В качестве примера возникающих форм рассеяния данных приведем (рис. 1.2.3.3.) изолинии рассеяния модельных данных, синтезированных в соответствии с параметрами модели Кидлера и Куртильо QC на экваторе и на широте 45° .

1.3. Разработка методов.

1.3.1. Разработка метода регидроксиляции на синтетических образцах.

Определение возраста археологических артефактов имеет критическое значение при проведении археологических и археомагнитных исследований. Изучение истории цивилизации, эволюции магнитного поля, климата и т.д. невозможно без знания возраста изучаемых объектов. В археологии помимо историко–культурных, типологических, стратиграфических и биологических методов датирования, широко используются инструментальные методы определения возраста, которые достаточно сложны и основаны на измерении физико-химических характеристик объектов.

Одним из относительно простых методов определения возраста является метод регидроксиляционного датирования (RHX), который был предложен в 2013 г. группой сотрудников Манчестерского и Эдинбургского университетов [Wilson et al., 2013]. Этот метод основан на изучении поглощения керамикой воды и измерении ее количества. Во время обжига при производстве керамики из нее удаляется вся содержащаяся влага, далее керамика остывает, и вода, присутствующая в окружающей атмосфере, начинает снова проникать в керамику. При этом гидроксильные ионы (ОН) в процессе медленной диффузии снова включаются в состав глинистых минералов керамики, происходит регидроксиляция, следствием которой является увеличение веса материала. Использование этого явления для датирования основывается на том, что увеличение веса при регидроксиляции происходит по точному кинетическому закону: согласно [Wilson et al., 2013, 2009] увеличение веса образца пропорционально корню четвертой степени из его возраста.

Напомним, вкратце, в чем состоит исходная модификация этого метода.

На первом этапе образец прогревается при 105°C для того, чтобы удалить физически сорбированную (молекулярную) воду, которая не взаимодействует с глинистой матрицей и находится в поровом пространстве. При этом также, удаляется некоторое относительно небольшое количество слабо связанной химически сорбированной воды. После прогрева образец помещается в климатическую камеру с контролируемой влажностью и температурой. Согласно [Wilson et al., 2009] масса образца сначала быстро нарастает, затем стабилизируется при некотором значении, называемом археологической массой. Затем тот же образец греется при $T=500^{\circ}\text{C}$, для того, чтобы удалить все формы воды (от молекулярной до гидроксильной) содержащиеся в глиняной матрице. Принимается, что в

результате образец приобретает ту массу, которую он имел непосредственно после изготовления изделия, к которому он относится.

Затем образец снова помещается в климатическую камеру с теми же температурно-влажностными параметрами, как и ранее. Масса образца при этом начинает быстро расти за счет захвата воды из вмещающей среды капиллярами, а также, за счет эффекта Ван – дер Ваальса. Затем (через 1-2 дня) этот процесс резко замедляется – теперь увеличение массы происходит вследствие диффузионного регидроксиляционного процесса, подчиняющегося степенному (степень 1/4) временному закону [Wilson et al., 2009, 2012].

Если условия в климатической камере идентичны тем, в которых образец находился в течение своей истории, тогда скорость регидроксиляции будет такая же, какая была в течение “жизни” образца. В этом случае, используя экстраполяцию, становится возможным определить время, необходимое для достижения образцом его археологической массы (t_A). Это время соответствует возрасту образца.

$$t_A = ((m_A - m_{RX}) / V m_{RX})^4$$

где m_A - археологическая масса, m_{RX} - масса образца перед помещением его второй раз в климатическую камеру, экстраполированная к $t^{1/4}=0$ и V - скорость регидроксиляции.

Если условия в камере отличны – это относительно легко учитывается [Wilson et al., 2009, 2012].

Не удивительно, что в силу своей кажущейся простоты, этот метод привлекает острое внимание исследователей и широко обсуждается в научной литературе. В то же время, следует признать, что он все еще остается недостаточно изучен, имеет ряд недостатков и сталкивается при своем применении с рядом проблем, о чем, в частности, свидетельствует тот факт, что число датировок, выполненных этим методом, до последнего времени остается крайне ограниченным. В настоящее время метод активно изучается и дорабатывается различными научными группами.

В рамках выполнения настоящего проекта была поставлена задача изучить перспективы применения этого многообещающего метода, оценить его надежность и, при необходимости, внести необходимые изменения в протокол измерений, предложенный авторами метода.

Для определения содержания регидроксиляционной воды нами было предложено использовать метод синхронного термогравиметрического (ТГ) и дифференциального сканирующего калориметрического (ДСК) анализа, сопряженного с масс-спектрометрией (МС) для анализа отходящих при прогреве газов. Анализы проводились на микротермоанализаторе STA 449C Jupiter совмещенном с квадрупольным масс-спектрометром QMS

403C Aeolos (NETZSCH Geraetebau GmbH, Германия). Такой комбинированный подход ранее не использовался при разработке RNX – метода и позволил нам получить новые результаты, важные для понимания границ его применимости.

Первоначально работы предполагалось выполнять на синтетических образцах (т.е. на специально изготовленной в лаборатории керамике). Однако уже в ходе первых экспериментов было обнаружено, что изготовленная в лаборатории керамика не набирает достаточное количество воды, в течение короткого времени ее жизни в условиях низкой влажности и температуры.

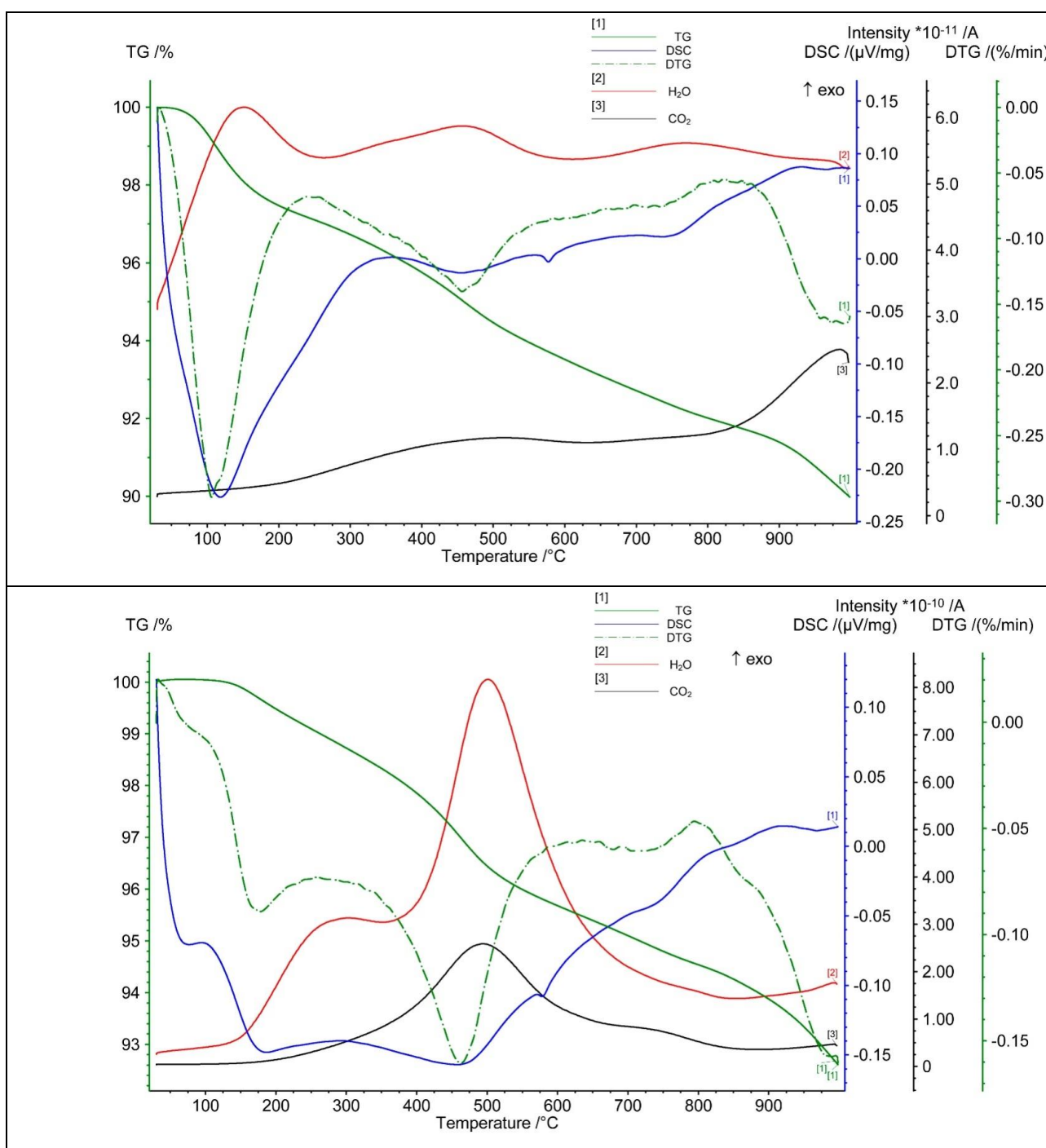


Рисунок **1.3.1.1.** Сравнение данных термогравиметрии (ТГ), дифференциальной термогравиметрии (ДТГ), дифференциального сканирующего калориметрического (ДСК) анализа и масс-спектрометрии (МС) без предварительного прогрева образца до 105°C (рис **1.3.1.1.a**, сверху) и после него (рис. **1.3.1.1.b**, снизу).

Поэтому для последующих экспериментов для проведения анализов в качестве модельных образцов был взят ряд обломков археологической керамики с достоверно известным возрастом. В ходе наших экспериментов мы использовали образцы французской и сирийской керамики такие, как керамика фаянсовых мастерских Ancy-le-Franc, фаянсовых мастерских Bois d'Erense, тротуарного кирпича замка Ecouen и другие, которые относятся ко II, X, XII, XVI и XVIII векам нашей эры.

Как и ожидалось, все образцы в процессе нагрева теряют часть своего веса. При этом термогравиметрия (ТГ), дифференциальная термогравиметрия (ДТГ), дифференциальный сканирующий калориметрический (ДСК) анализ и масс-спектрометрия (МС) ясно показывают, что в процессе нагрева удаляются различные компоненты. Ниже будут представлены два наиболее важных результата, полученные в ходе наших экспериментов.

Первый результат состоит в том, что наши данные, в целом, подтверждают описание процесса дегидроксиляции, сделанное Wilson et al. (2012, 2013), внося в него, при этом, некоторые важные коррективы.

Без предварительного прогрева до 105°C в процессе нагревания образцов от 30°C до 1000°C четко проявляется главный пик в области 100°C, после которого проявляется несколько других не столь очевидных пиков, значительно меньших по амплитуде (рис. **1.3.1.1.a**). Напротив, предварительный прогрев до 105°C позволяет получить гораздо более четкую характеристику процесса удаления воды (рис. **1.3.1.1.b**). В этом случае гораздо более четко выделяются пики в области 300°C и 500°C.

Эти наблюдения, на первый взгляд, отлично согласуются с данными [Wilson et al., 2012] и указывают на присутствие воды в нескольких формах в изучаемых образцах. Пик около ста градусов соответствует удалению (через испарение) физически сорбированной воды (компонента T0 в [Wilson et al., 2012]).

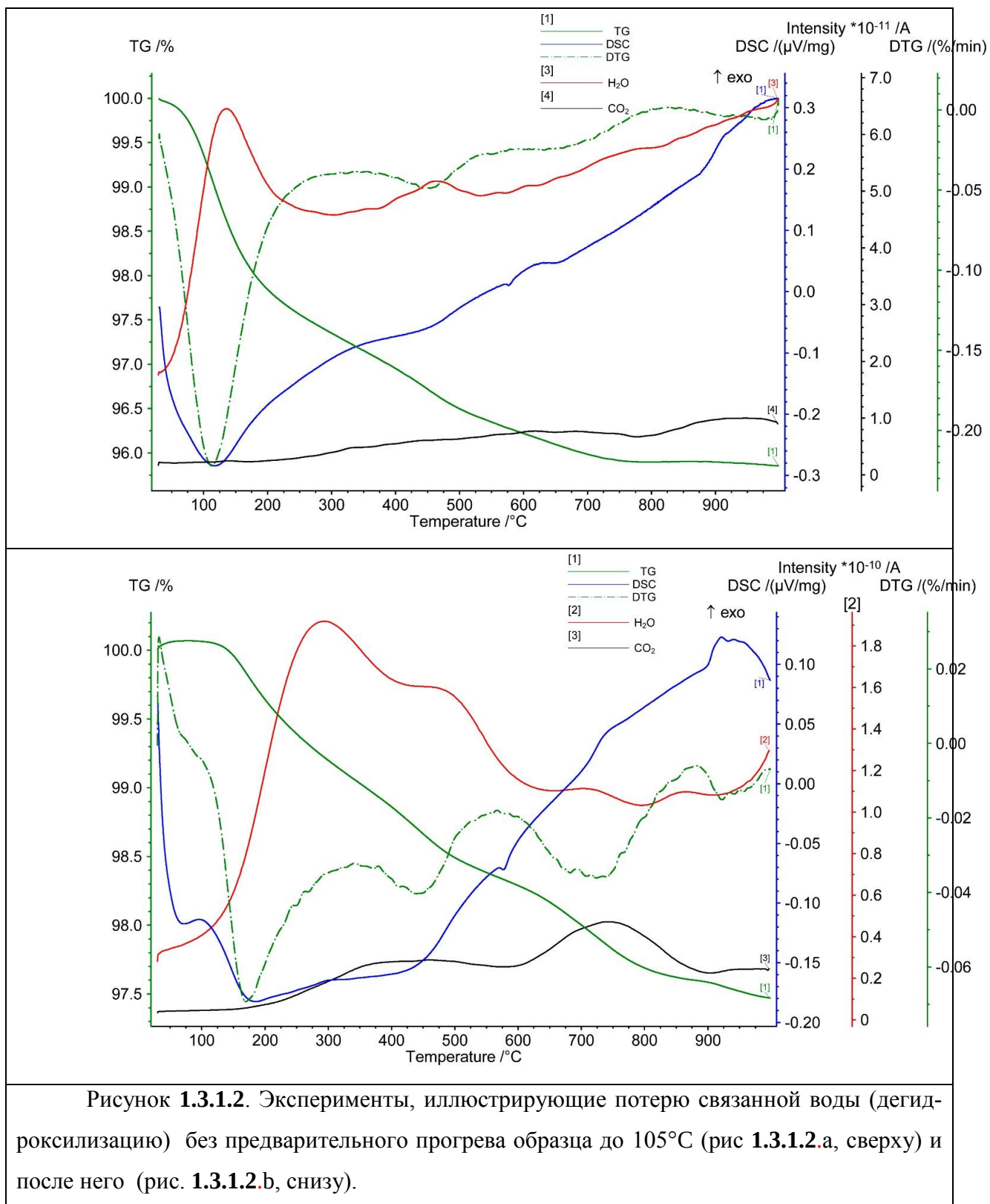
Пик потери воды в области 300°C (Рис. **1.3.1.1**, 2) или в области 200°C (Рис. **1.3.1.3**) связан с удалением слабосвязанной хемосорбированной воды (компонента T1 в [Wilson et al., 2012]). И, наконец, пик около 500°C соответствует потере компоненты, связанной с гидроксильными ионами (компонента T2 в [Wilson et al., 2012]). Именно последняя компонента используется для определения возраста керамики методом RNX. Более детально изучение данных экспериментов, однако, указывает на существование в некоторых из изученных образцов еще двух небольших пиков в области 700°C и 850°C. Этот ре-

зультат указывает на то, что не все гидроксильные ионы удаляются в области 500°C, часть из них остается в связанном виде вплоть до температур прогрева 700°C и , даже, 850°C [Bowen et al., 2011].

Таким образом, наши эксперименты показывают, что прогрев образцов только до 500°C может оказаться недостаточным, для полного удаления компоненты T2, в результате чего оценка массы, связанная с потерей гидроксильных ионов окажется ошибочной, а полученный возраст – существенно заниженным.

Второй важный результат, полученный благодаря комбинированному использованию ТГ и ДСК анализов вместе с масс-спектрометрией состоит в том, что потеря веса образцов керамики при прогреве может быть связана не только с потерей воды (гидроксильных групп), но также с выделением двуокиси углерода CO₂. По содержанию соединений углерода (в виде карбонатов или органики) наши образцы могут быть разделены на 2 группы – не содержащие углерод и углеродсодержащие (рис. 1.3.1.2, 3).

В последних комбинированные TG и MS анализы ясно показывают выделение значительного количества CO₂ в области температур ~ 500°C (показано черным). Этот результат имеет принципиальное значение для применения RNX метода, поскольку указывает на важный источник возможной ошибки при определении возраста. Отмеченная потеря веса из-за выделения CO₂ указывает на необходимость тщательного минералогического анализа.



Это необходимо, чтобы исключить или, по крайней мере, определить образцы содержащие карбонаты и органику, разрушение которых при прогреве может приводить к образованию CO₂. Наши результаты ясно демонстрируют значение комбинированных TG и MS измерений.

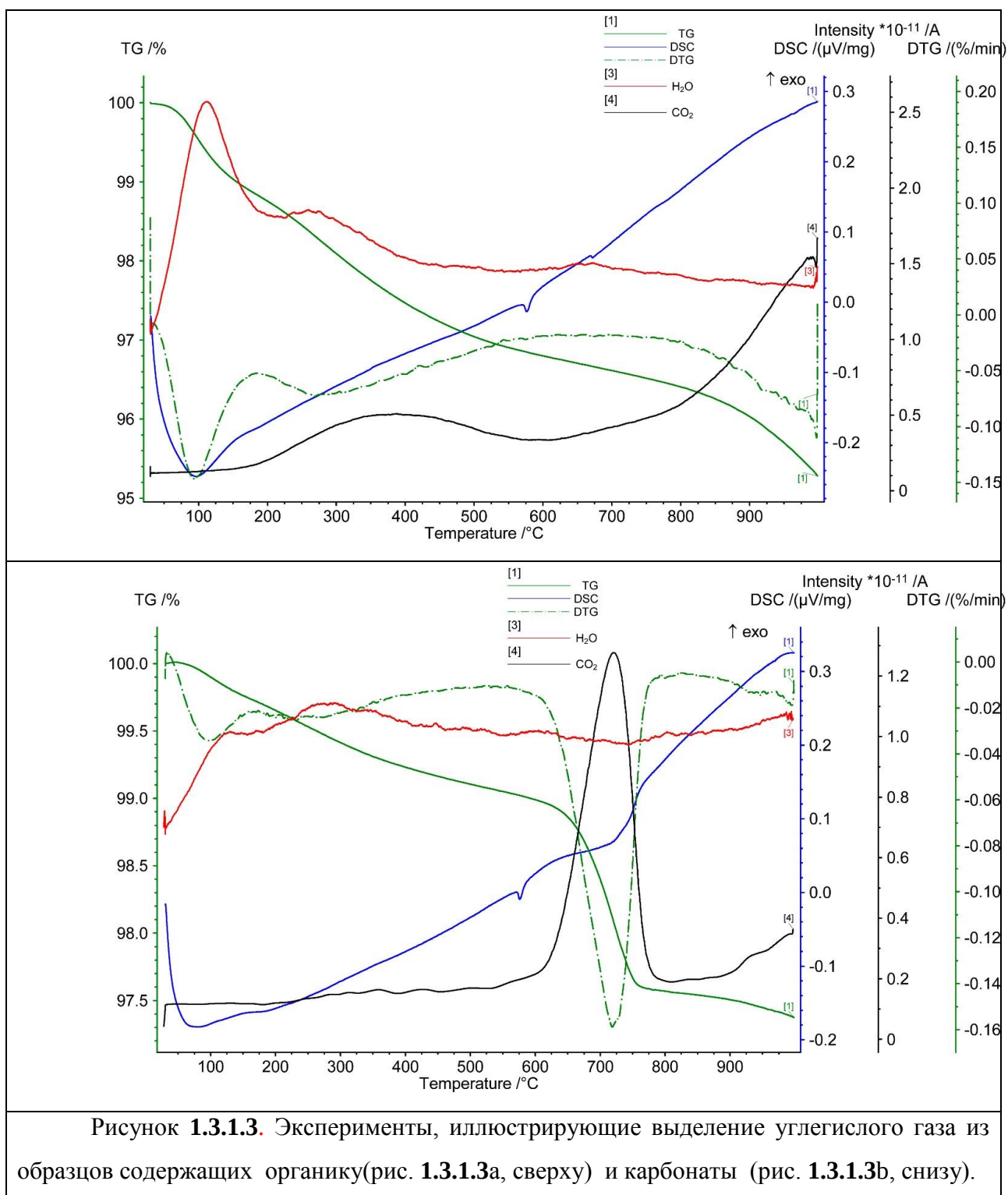


Рисунок 1.3.1.3. Эксперименты, иллюстрирующие выделение углекислого газа из образцов содержащих органику(рис. 1.3.1.3а, сверху) и карбонаты (рис. 1.3.1.3b, снизу).

1.3.2. Разработка метода разложения коэрцитивных спектров применительно к анализу вариаций состава и характеристик магнитных фракций в осадочных разрезах.

Геологические объекты, как правило, содержат сложную смесь магнитных минералов различного происхождения. Тщательное изучение свойств осадочных разрезов, в частности, озерных донных отложений, позволяет получить ценную информацию об изменениях окружающей среды и событиях происходивших на данной территории в прошлом. Одним из важных источников информации об изменениях окружающей среды являются данные о магнитных свойствах осадков, содержащих различные магнитные компоненты (парамагнитную, биогенную, терригенную и т.д.). Количественно выделение различных магнитных фаз предоставляет анализ коэрцитивных спектров (КС) нормального остаточного намагничивания (IRM). Однако, интерпретация КС реальных пород осложняется тем, что геологические объекты, как правило, содержат сложную смесь магнитных минералов различного происхождения.

Интерес к проблеме выделения ферромагнитных компонент связан и с необходимостью идентификации вклада биогенных магнетиков в остаточную намагниченность осадков, что обусловлено уникальными свойствами магнитных зерен, имеющих биогенное происхождение (однодоменность, стехиометрия зерен, совершенная форма кристаллов). Традиционно, количественное выделение различных магнитных фаз в образце ведётся в предположении, что коэрцитивный спектр образца, содержащего только одну магнитную фракцию, хорошо аппроксимируется лог-нормальным распределением. Исходно, метод, основанный на этом допущении, был развит в работе [Kruiver et al., 2001]. В дальнейшем этот метод разделения ферромагнитных компонент был развит в различных модификациях рядом авторов [см. например, Heslop et al., 2002; Egli, 2004].

Однако, как показали многочисленные эксперименты, предположение о лог-нормальном распределением КС выполняется далеко не всегда, что приводит к сложностям при практической интерпретации КС реальных объектов. По этой причине [Heslop and Dillon, 2007] предложили принципиально новый подход к компонентному анализу КС, используя так называемый метод неотрицательной матричной факторизации, разработанный [Lee and Seung, 2001]. Суть метода состоит в разложении множества подобных кривых на сумму небольшого числа элементарных составляющих без априорного знания как формы, так и количественного вклада составляющих. Для этого матрица данных представляется в виде произведения матрицы коэффициентов на матрицу элементарных со-

ставляющих. На первом шаге итерационного процесса элементы этих матриц задаются произвольным образом, а далее происходит их оптимизация путём минимизации эвклидова расстояния между матрицами фактических и модельных данных. В этом аспекте этот метод похож на известный метод главных компонент, но его большое преимущество состоит в том, что при выполнении процедуры минимизации накладывается требование неотрицательности всех элементов матриц коэффициентов разложения и элементарных составляющих. Это обстоятельство очень важно в ситуации, когда из физических соображений мы заведомо знаем, что такое требование должно выполняться.

Метод неотрицательной матричной факторизации был развит и дополнен нами в работе [Fabian et al., 2016] с целью получения информации не только о виртуальных, но и реальных минералогических компонентах, для чего нами было сделано важное дополнение к методике, заключающееся в привлечении дополнительной информации, содержащейся в термокривых и петлях гистерезиса исследуемых образцов. Такая модификация позволила значительно повысить достоверность интерпретации КС в терминах выделения реальных ферромагнитных компонент, содержащихся в породе (терригенного, аутигенного или биогенного магнетита или грейгита и т.д.).

Для практического применения метода нами была разработана специальная программа на языке FORTRAN (см. выше, раздел «Разработка программного обеспечения»).

Разработанная компьютерная программа была применена при исследовании осадков озера Хубсугул, на керне которого длиной 53 метр были сняты КС для более чем тысячи образцов. Результаты разложения позволили выявить очень большую изменчивость содержания биогенного материала в осадке и наличие значимых корреляций между вариациями интенсивности идентифицированных минералогических компонент (терригенного магнетита и биогенных магнетита и грейгита) (рис. 1.3.2.1.).

Выявленные вариации отражают изменения биопродуктивности, климатических и/или геологических условий в окрестности озера Хубсугул. Показано, что резкие изменения в характере выделенных магнитных фаз могут служить хорошими маркерами климатических изменений, в частности, наступлений межледниковых периодов.

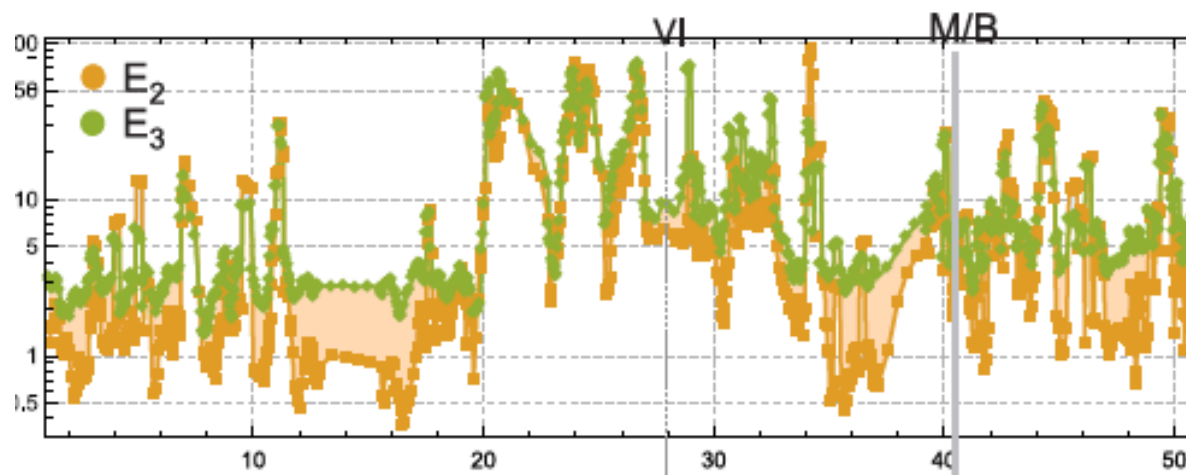


Рисунок 1.3.2.1. Зависимость концентрации биогенных магнетита (E₂) и грейгита (E₃) с глубиной керна.

Применение разработанного алгоритма к кернам осадочных пород может значительно расширить возможности магнитных методов при анализе палеоклиматических палеогеографических реконструкций.

1.3.3. Разработка методов учета влияния термохимических процессов окисления на формирование естественной остаточной намагниченности вулканитов и на результаты палеомагнитных исследований: теоретический и экспериментальный анализ.

Задачи палеомагнетизма решаются путём расшифровки информации о характеристиках геомагнитного поля, записанной в древних горных породах, что возможно лишь при условии сохранности первичной намагниченности образцов исследуемых горных пород. Для целей определения палеонапряжённости на вулканических породах, кроме первичности и хорошей сохранности NRM, требуется доказать ещё и термоостаточную природу (TRM) естественной остаточной намагниченности (NRM). В то же время известно, что стабильная и значительная по величине остаточная намагниченность может быть создана и в результате химических изменений магнитных минералов при повышенных температурах. Следуя [Draeger et al., 2006], намагниченность, возникшую при длительной выдержке образцов при повышенной температуре T_{CRM} , принято называть химической (CRM). В вопросе о влиянии присутствия CRM на результаты определения палеонапряжённости (B_{anc}) до сих пор нет ясности. Те же работы, что имеются в литературе, приводят противоречащие друг другу данные о схожести термостабильности TRM и TCRM [Gendler et al., 2005, Draeger et al., 2006]. Draeger et al., 2006 предположили, что TRM может иметь схожие с CRM спектры блокирующих температур, и стало быть, эти виды намагниченности будут давать в итоге ложные определения B_{anc} . Подтверждение или опровержение этой гипотезы крайне важно для оценки достоверности Мировой Базы Данных (МБД) по палеонапряжённости и требует дальнейших исследований как в экспериментальной, так и в теоретической областях и численного моделирования процессов образования CRM и TCRM.

Главная цель настоящей работы состояла в разработке критериев определения термохимической намагниченности вулканитов. При этом решались следующие задачи:

а) выполнения детальных экспериментов по определению палеонапряжённости B_{anc} методом Телье-Коэ на образцах содержащих CRM, возникшей при термическом отжиге титаномагнетита; б) проведения численного моделирования процесса образования CRM и методики Телье-Коэ; в) количественная оценка степени искажения величины B_{anc} как по экспериментальным данным, так и по результатам численного моделирования и выработка рекомендаций по селекции термохимической намагниченности вулканитов.

Исходным материалом для экспериментов послужили образцы титаномагнетита (ТМ) сибирских траппов возраста 251 млн. лет и ТМ базальты из бортового вала вулкана Ключевской (побочное извержение 25.02.1987).

Лабораторные эксперименты с ТМ проводились в трёх вариантах при четырёх температурах отжига $T_{CRM} = 400, 450, 500$ и 530 °С на кубиках-дубликатах размером до 1 см, при этом в каждом эксперименте отжиг проводился в течение 200 часов в лабораторном поле $B_{lab} = 50$ мкТл, а охлаждался образец в нулевом поле, то есть создавалась «чистая» CRM.

Согласно имеющимся теоретическим представлениям, образование CRM происходит через механизм роста объёма мелких суперпарамагнитных (СПМ) зёрен, когда при выдержке при повышенной температуре T в присутствии внешнего поля $\mathbf{B}$ их объём вырастает до блокирующего объёма v_b . Несмотря на большую распространенность такого сценария, он мало исследован как экспериментально, так и теоретически.

Для сравнения результатов экспериментов с теоретическими представлениями, нами выполнено численное моделирование процесса образования CRM методом Монте-Карло в системе однодоменных (ОД) взаимодействующих частиц и моделирование метода определения палеонапряженности по процедуре Телье-Коэ. Моделирование методом Монте-Карло заключается в генерации последовательности случайных событий с некоторым временным интервалом Δt . Ввиду стохастического характера результатов, получаемых методом Монте-Карло, они представляют собой случайные величины и подвержены заметным флуктуациям. Для их уменьшения при каждом фиксированном наборе параметров проводилось от 20 до 100 Монте-Карло экспериментов и для построения диаграмм Араи-Нагата использовалось среднее по этим экспериментам.

Практически все диаграммы Араи-Нагата, полученные в ходе проведенных экспериментов, обладают той или иной степенью вогнутости. Вместе с этим, однако, на них присутствуют квазипрямолинейные участки, где кривизна почти незаметна. Это позволяет выполнить формальную процедуру определения B_{anc} по CRM (рис. 1.3.3.1., интервал температур 450-575 °С). Подчеркнём, что величина вычисленной «палеонапряженности» оказывается всегда в (1.5 – 2) раза ниже той, в которой эта CRM создавалась.

Для количественного анализа ошибок определения палеонапряженности по результатам методики Телье использовалась величина $DRAT$ [Selkin, Tauxe, 2000], равная нормированному на длину фит-линии (выделена красным цветом) отклонению величины повторных $pTRM$ («чек-точек») от первоначальных значений $pTRM$ (рис. 1.3.3.1.). Данная оценка была предложена в работе [Selkin, Tauxe, 2000]

На **рис. 1.3.3.1.2** представлены результаты численного моделирования для ансамбля ОД невзаимодействующих частиц.

Для сравнения диаграмм Арай-Нагата, полученных на ансамбле ОД частиц с «первичной» термохимической намагниченностью, проведено численное моделирование процесса образования TRM на массивах частиц, полученных при образовании CRM в поле 100 мкТ (включая координаты частиц и их параметр коэрцитивности). Для этого на данном ансамбле частиц было сначала проведено «терморазмагничивание» («нагрев» до температуры Кюри) и затем «охлаждение» в поле 100 мкТ, и были выполнены численные эксперименты по моделированию процедуры Телье-Коэ.

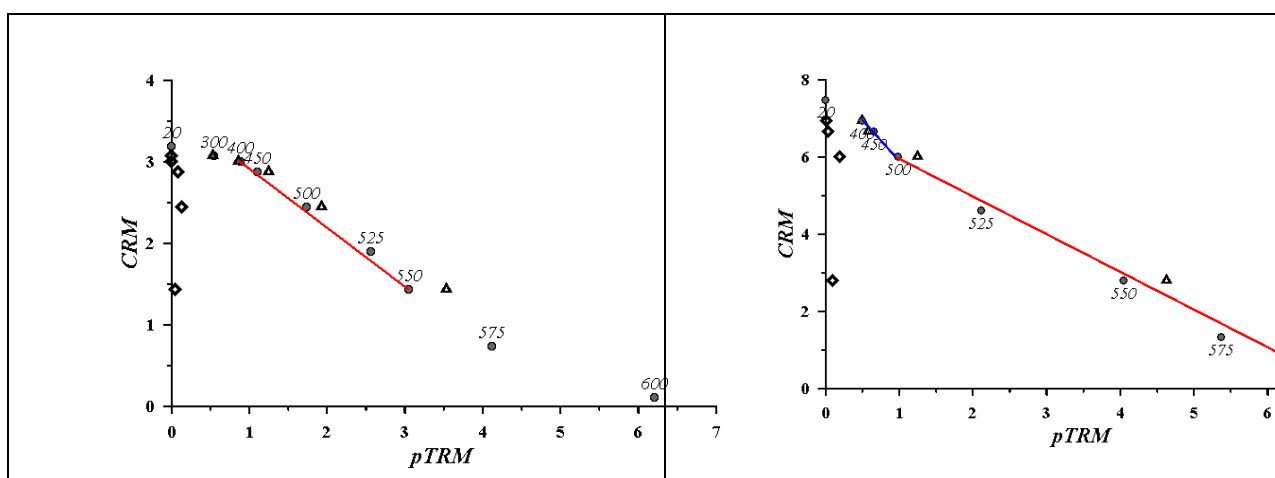


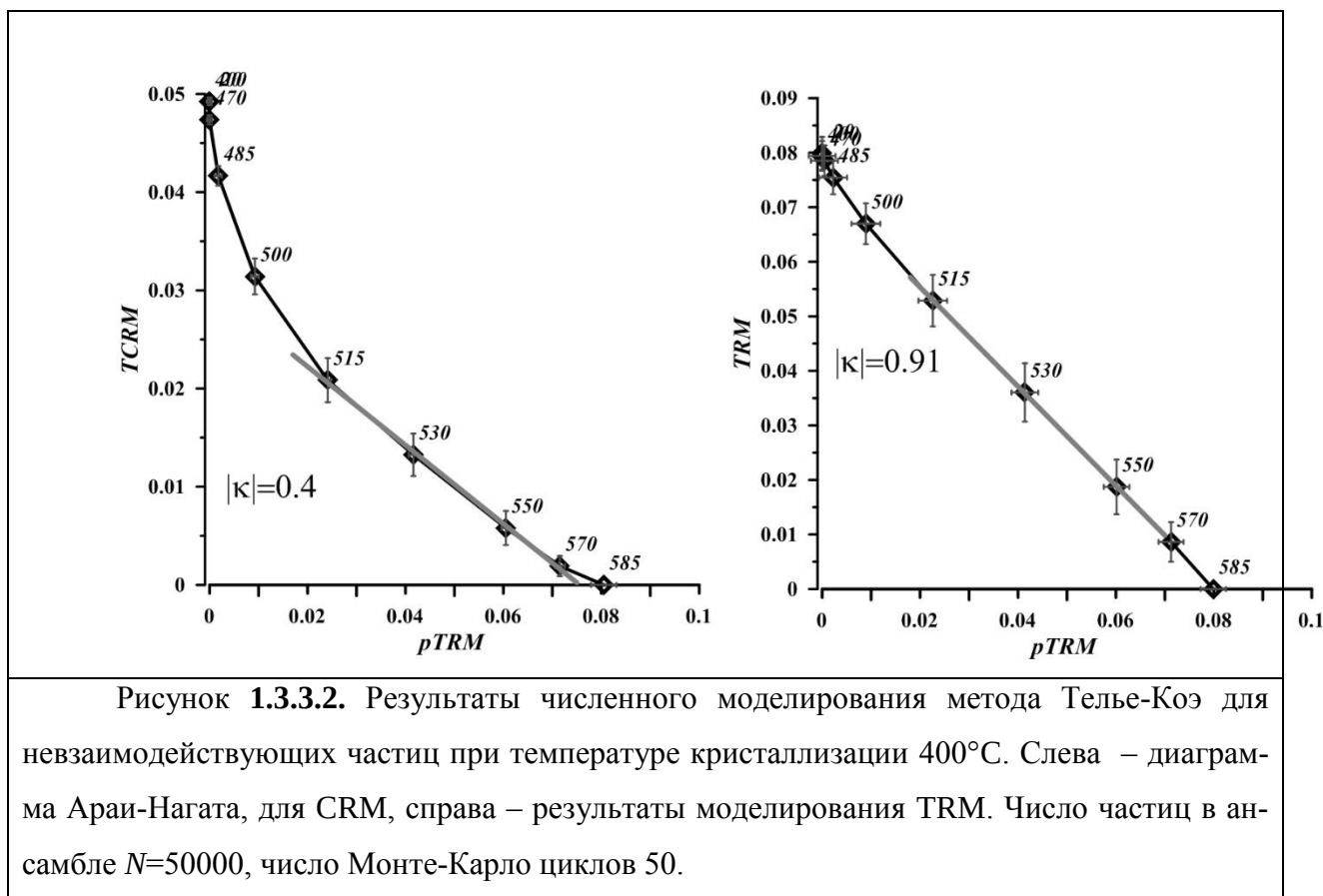
Рисунок 1.3.3.1. Диаграммы Арай-Нагата (CRM, pTRM), полученные при температуре кристаллизации $T_{CRM} = 400^{\circ}C$ (справа) и $T_{CRM} = 530^{\circ}C$ (слева). Треугольники на графиках отвечают чек-точкам pTRM. Эксперименты проводились в поле $B = 50$ мкТ. Для правого графика получено $B_{anc} = 21.5$ μT при максимальном отклонении чек-точки (DRAT) = 18%, для левого графика $B_{anc} = 26$ мкТ, DRAT = 12%.

Результаты этих расчетов представлены на графиках **рис. 1.3.3.2** справа. Здесь и далее на диаграммах Арай-Нагата вертикальными и горизонтальными линиями показаны ошибки расчёта намагниченности вследствие флуктуаций, присущих методу Монте-Карло.

При рассмотрении диаграммы Арай-Нагата, полученной для ансамбля невзаимодействующих ОД частиц, несущих T_{CRM} (**рис. 1.3.3.2.**, левый график) следует отметить наличие на ней заметной кривизны на большей части спектра блокирующих температур. Напротив, на аналогичной диаграмме, рассчитанной для случая, когда намагниченность имеет термоостаточную природу (**рис. 1.3.3.2.**, справа), кривизна очень мало заметна. Эти черты рассчитанных диаграмм полностью согласуются с теоретическими представления-

ми, но вместе с тем на эксперименте мы наблюдаем гораздо более протяжённые квази-прямолинейные участки на диаграммах, полученных для TCRM. Можно предположить, что это расхождение связано с тем, что в природе мы почти всегда имеем дело с взаимодействующими частицами. Для проверки этого предположения мы провели численное моделирование диаграмм Арай-Нагата для взаимодействующих ОД частиц.

На рис. 1.3.3.3. показаны результаты численного моделирования для ансамбля ОД взаимодействующих частиц. Как видно из представленных графиков, при наличии магнитостатического взаимодействия, действительно, наблюдается появление протяжённых квазипрямолинейных участков на диаграммах, полученных для TCRM.



В том случае, когда намагниченность имеет термоостаточную природу, вогнутость диаграмм Арай-Нагата практически отсутствует как для взаимодействующих, так и для невзаимодействующих частиц, так что в этом случае диаграммы Арай-Нагата близки к идеальным.

Выводы.

1. Экспериментальные диаграммы Арай-Нагата, полученные по образцам, несущим CRM, созданную при вторичном прогреве титаномagnetитов до умеренных температур от

400 до 530 °C имеют значительный линейный участок в интервале от некоторой температуры, превышающей температуру создания T_{CRM} до температур, близким к температуре Кюри. «Палеонапряжённость» B_{anc} , определённая по таким участкам, оказывается в 1.5-2 раза заниженной по сравнению с «истинным» полем создания CRM.

2. Выполнено детальное численное моделирование процесса образования CRM и методики Телье определения палеонапряжённост. Показано, что существование протяжённых квазипрямолинейных участков на диаграммах Араи-Нагата, полученных для CRM, обеспечивается наличием значительно магнитостатического взаимодействия между частицами.

3. Хотя согласно формальным критериям качества, предложенным Coe *et al.*(1978) и результатам повторных нагревов (“check-points”), определения B_{anc} заслуживают доверия, критериями присутствия CRM в образцах могут быть наличие заметных криволинейных участков на диаграммах Араи-Нагата и величина параметра DRAT, превышающая допустимую величину 5%.

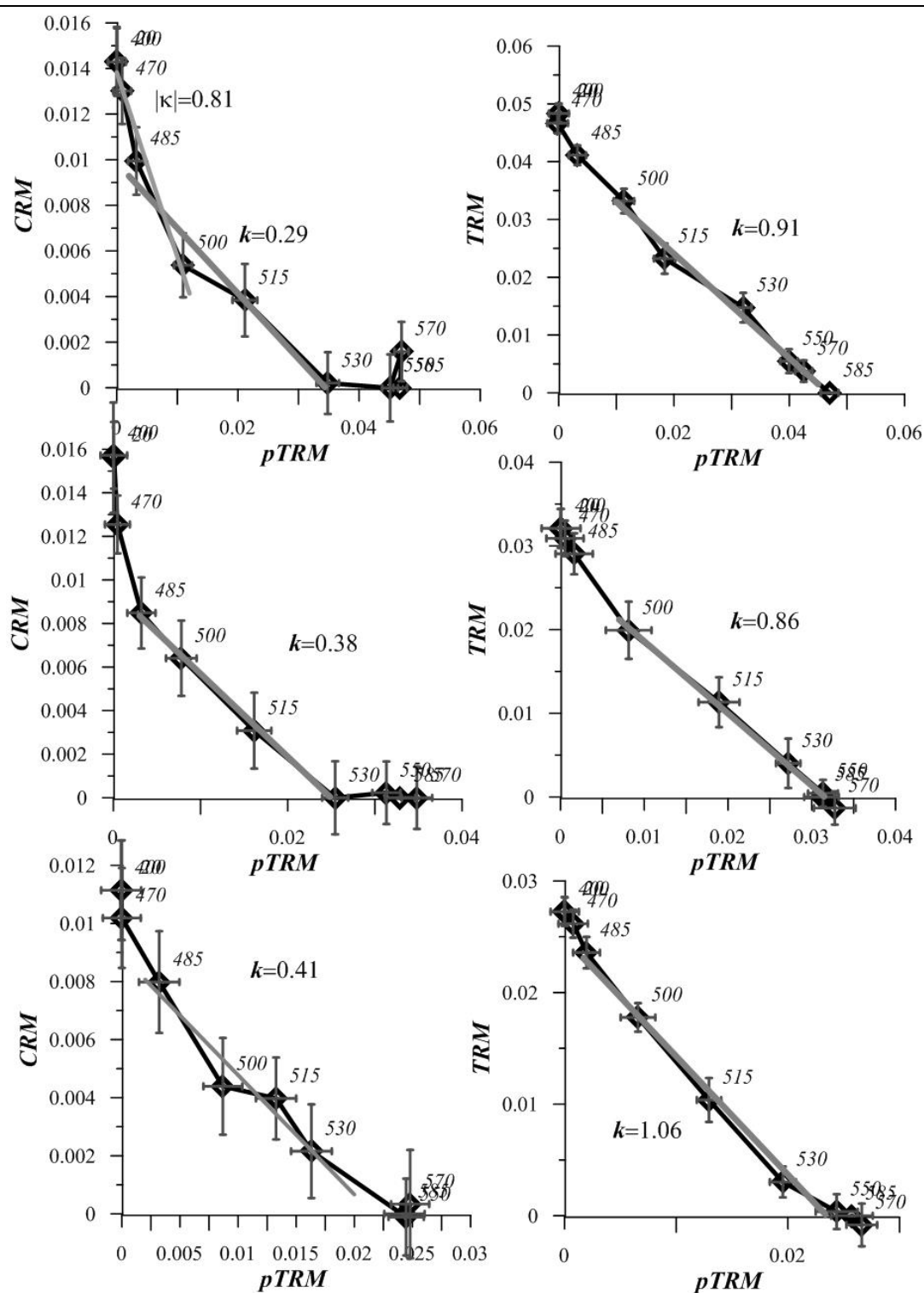


Рисунок 1.3.3.3. Диаграммы Араи-Нагата для взаимодействующих частиц ($c = 0.27\%$, 0.58% , 0.8% – сверху вниз). Слева – результаты численного моделирования CRM при $T_{CRM} = 400^\circ\text{C}$, справа – результаты моделирования для TRM. Число частиц в ансамбле $N = 3000$, число Монте-Карло циклов от 30 до 60.

1.3.4. Детектирование занижения наклона в исследуемых осадочных породах и её коррекция лабораторными и аналитическими методами.

Актуальность этих исследований определяется острой необходимостью получения надёжных палеомагнитных определений по осадочным породам перми-триаса Восточно-Европейской платформы, учитывающих эффект занижения наклона в них. Эффект занижения палеомагнитного наклона был впервые обнаружен около 60 лет назад и в настоящее время хорошо изучен на примере осадочных пород, обладающих детритовой (ориентационной) остаточной намагниченностью (DRM). Степень проявления эффекта занижения наклона оценивается коэффициентом занижения f , который может быть вычислен из выражения: $\text{tg}(I_{\text{изм}}) = f \times \text{tg}(I_{\text{внеш}})$, где $I_{\text{изм}}$ – палеомагнитное наклонение, измеренное в образце, а $I_{\text{внеш}}$ – наклонение внешнего поля. В настоящее время существует две группы методов определения коэффициента занижения наклона: это методы, использующие сведения о магнитной анизотропии пород, и статистический метод Е-І [Kodama, 2012]. Оба метода имеют свои достоинства и недостатки. Метод Е-І относительно прост в использовании, однако требует расширенных выборок палеомагнитных направлений, корректно отражающих запись вековых вариаций геомагнитного поля в изученном интервале разреза. Методы магнитной анизотропии подразумевают значительный объём лабораторной работы и, в ряде случаев, наличие специфического оборудования для выполнения экспериментов по переосаждению. Последние исследования показали [Li and Kodama, 2016], что оценки коэффициента занижения наклона f , полученные разными методами, статистически значимо не отличаются друг от друга. Однако, учитывая особенности каждого из методов оценки коэффициента занижения наклона, для получения максимально надёжных результатов, рекомендовано, по возможности, использовать оба метода – магнитной анизотропии и Е-І.

Важно заметить, что игнорирование эффекта занижения наклона в процессе получения палеомагнитных определений по осадочным породам может являться причиной значительных ошибок при интерпретации палеомагнитных данных. Например, среднее значение коэффициента занижения наклона в магнетит-содержащих осадочных породах составляет 0.75 [Kodama, 2012]. В этом случае, отсутствие соответствующей поправки может приводить к смещению вычисленного палеомагнитного полюса от «истинного» на 10-15°, что существенно, в частности, при решении палеотектонических задач. В настоящее время количество палеомагнитных определений, полученных с учётом эффекта занижения наклона, крайне невелико, что определяется высокими требованиями к исходным выборкам палеомагнитных направлений. В ходе работ по проекту нами

выполнены детальные палеомагнитные исследования опорных разрезов осадочных пород верхней перми- нижнего триаса, по результатам которых получены уникальные выборки палеомагнитных направлений, часть из которых полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к исходным данным для оценки коэффициента занижения наклона методом E-I. Заверка полученных результатов выполнена на пилотной коллекции образцов методом магнитной анизотропии.

Цель настоящего исследования состояла в обнаружении и оценке вклада эффекта занижения наклона в палеомагнитную запись пермо-триасовых осадочных пород Восточно-Европейской платформы и «стабильной» Европы. При этом решались следующие задачи:

- 1) Проведение детального палеомагнитного опробования опорных разрезов позднепермских-раннетриасовых осадочных пород Русской плиты и центральной Германии;
- 2) Получение представительных выборок палеомагнитных направлений для каждого изученного разреза;
- 3) Детектирование эффекта занижения наклона в изученных осадочных породах и оценка соответствующего коэффициента аналитическим методом Elongation-Inclination [Tauxe and Kent, 2004]. Заверка полученных результатов лабораторным методом магнитной анизотропии.

Основными объектами исследований, по которым в 2016 г. были получены валидные результаты, являлись опорные разрезы осадочных пород, возраст которых уверенно устанавливается как позднепермский и/или раннетриасовый, находящиеся в различных регионах Восточно-Европейской платформы и «стабильной» Европы (рис. 1.3.4.1.). В пределах осадочных бассейнов Русской плиты были изучены разрезы Нижегородской области – Пучеж, Жуков овраг и Окский съезд, Вологодской области – разрез Сухона, а также разрезы Оренбургской области – Зубочистка, Боевая гора, Вязовка, Самбуллак (рис. 1.3.4.1., б) и Астрахановка (рис. 1.3.4.1., в). Осадочные бассейны центральной Германии были изучены в разрезах Нелбен (Nelben), Каашвиц (Caaschwits) и Хёйнебах (Heinebach). В изученных обнажениях породы верхней перми представлены красноцветными преимущественно мелкообломочными терригенными породами – алевролитами, песчаниками, аргиллитами и глинами, с редкими прослоями карбонатов – известняков или доломитов. Отложения нижнего триаса чаще всего представляют собой грубообломочные, нередко плохо сцементированные серо- или красноцветные породы – конгломераты, брекчии, гравеллиты и пески различной размерности.

Отбор палеомагнитных коллекций производился штучным методом: с заданным шагом по мощности, величина которого определялась опробуемым интервалом разреза и составляла от 5 см до 0,5 м, вручную отбирался ориентированный с помощью магнитного компаса образец, из которого в лаборатории выпиливалось от 1 до 4 палеомагнитных образцов кубической формы с длиной ребра 2 см. Из каждого обнажения отбиралось не менее 100 ориентированных штучек; разрез Пучеж был опробован с максимальной детальностью и результаты получены по 270 образцам. Лабораторные петро- и палеомагнитные исследования осуществлялись в лаборатории Главного геомагнитного поля и петромагнетизма Института физики Земли РАН и петромагнитной лаборатории геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Для измерений остаточной намагниченности образцов использовался криогенный магнитометр (2G Enterprises, США) и спин-магнитометры JR-6 (AGICO, Чехия); температурные магнитные чистки выполнялись с применением немагнитных печей MMTD80 (Magnetic Measurements, Англия). Измерения начальной магнитной восприимчивости и её анизотропии производились на капнометрах KLY-4 и MFK-1A (AGICO, Чехия). Для вычисления коэффициента занижения наклона в осадочных породах использован статистический метод E-I [Tauxe and Kent, 2004], а также лабораторный метод магнитной анизотропии [Kodama, 2012]. Обработка результатов магнитных чисток выполнялась с использованием программных пакетов Р.Энкина и PmagPy v.3.2.1.

Оценка коэффициента занижения наклона f производилась с использованием результатов магнитных чисток коллекций, отобранных в 2015-2016 годах из разрезов пермо-триасовых осадочных пород Оренбургской и Новгородской областей и центральной Германии, включающих в себя, в общей сложности, ~1300 ориентированных образцов. Результаты магнитных чисток сводного разреза верхней перми Вологодской области «Сухона» были любезно предоставлены нам А.Г.Иосифиди (ВНИГРИ); интерпретация результатов магнитных чисток была выполнена непосредственно исполнителями данного проекта. Из-за посредственного качества палеомагнитной записи, пригодными для оценки коэффициента f статистическим методом E-I оказались палеомагнитные данные по 4 разрезам – Пучеж, Жуков овраг, Окский съезд и Сухона, поскольку полученные для них выборки палеомагнитных направлений насчитывают более 100 единичных направлений. Для разрезов Пучеж и Жуков овраг величина коэффициента занижения наклона составила $f=0.9$. Неожиданно сильно проявлен эффект занижения наклона в разрезе Окский съезд (г.Нижний Новгород) – $f=0.4$ (рис. 1.3.4.2.), что связывается нами с наличием в данном разрезе грубообломочных фаций, в том числе средне-крупнозернистых песчаников. Вели-

чина коэффициента f для разрезов Каашвиц, Нелбен, Астрахановка и Сухона составила $f=0.7$ (рис. 1.3.4.2.). Результаты, полученные для разрезов Каашвиц, Нелбен и Астрахановка, несмотря на устойчивость решения при разных параметрах моделирования и разной «чистоте» анализируемой выборки, следует считать предварительными в виду недостаточного количества (менее 100) единичных палеомагнитных направлений в исходных распределениях.

Оценка занижения наклона методом магнитной анизотропии выполнялась на пилотной коллекции образцов разреза Жуков овраг. В ходе эксперимента было показано, что анизотропия магнитной восприимчивости контролируется зёрнами магнетита, для чего для 25 образцов с различной литологией были выполнены измерения анизотропии магнитной восприимчивости (AMS) и анизотропии идеальной намагниченности (AARM), что подтвердилось и путём проведения эксперимента по переосаждению трёх наиболее представительных образцов в водной среде в известном магнитном поле. Вычисление коэффициента f производилось с использованием методики, описанной в работе [Bradbury, 2005] с использованием параметров эллипсоида AMS; полученная оценка находится в согласии с оценкой, полученной методом E-I и составляет $f=0.93$.

Выводы

1) По результатам детального палеомагнитного изучения опорных разрезов верхнепермских-нижнетриасовых отложений центральной Европы и Русской плиты, на современном методическом и аппаратном уровне, получены представительные выборки палеомагнитных направлений для 7 разрезов.

2) С использованием полученных выборок палеомагнитных направлений, аналитическим методом E-I выполнена оценка коэффициента занижения наклона в породах семи из изученных разрезов: для разрезов Каашвиц, Нелбен, Сухона и Астрахановка его величина составила $f=0.7$; для разрезов Пучеж и Жуков овраг – 0.9. Полученная оценка коэффициента f для разреза Жуков овраг заверена методом магнитной анизотропии. Неожиданно сильно проявлен эффект занижения наклона в разрезе Окский съезд, для которого $f=0.4$, что предварительно связывается с литологическими особенностями пород.

3) Благодаря высокой детальности проводимых исследований, полученные палеомагнитные данные позволили существенно уточнить магнитостратиграфические схемы всех изученных разрезов (рис. 1.3.4.3.), что позволяет проводить корреляцию некоторых из них с глобальной шкалой магнитной полярности.

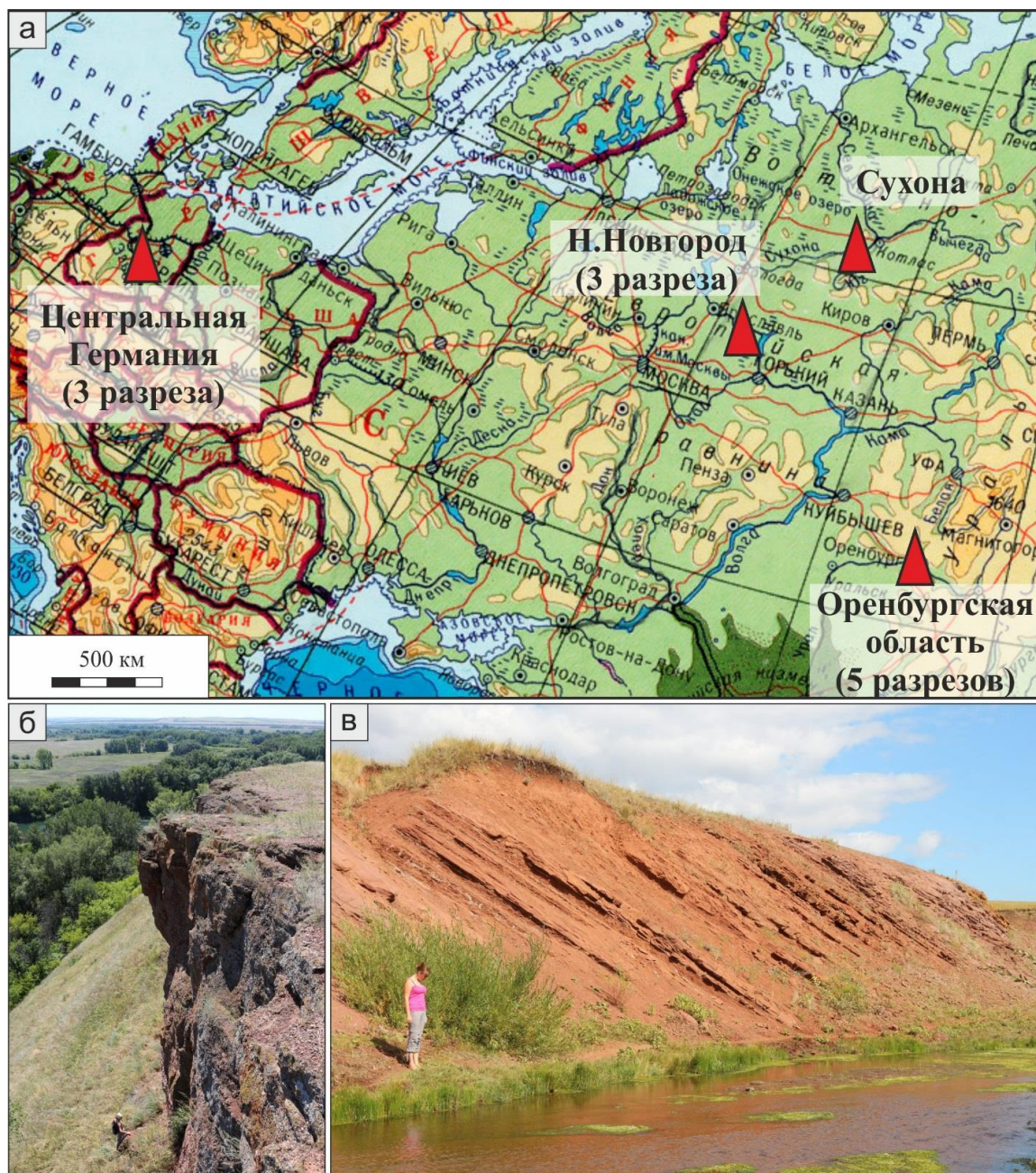


Рисунок 1.3.4.1. (а) Расположение исследованных пермо-триасовых разрезов Русской плиты и «стабильной» Европы. (б) Разрез Самбуллак, Оренбургская область, верхняя часть (T_1). (в) Разрез Астрахановка, Оренбургская область.

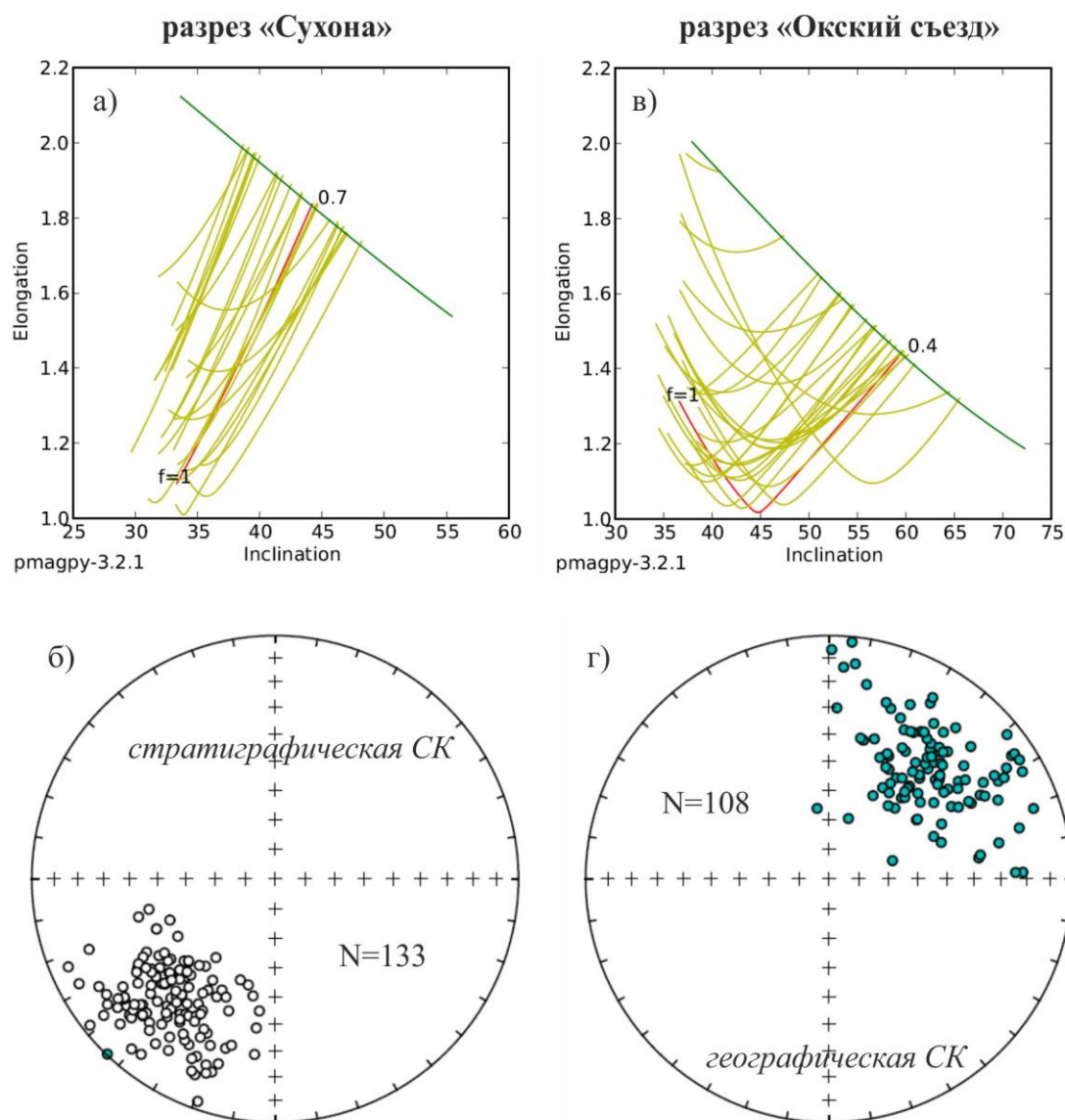


Рисунок 1.3.4.2. Примеры результатов оценки фактора занижения наклона в разрезах Сухона и Окский съезд методом Elongation-Inclination.

Диаграммы Е-І (а, в): зеленая кривая – отношение Е-І, ожидаемое согласно модели ТК03.GAD, желтые кривые – отношения Е-І, полученные в результате численного моделирования распределения векторов при разных величинах коэффициента занижения наклона f ; красная кривая – аппроксимирующая кривая и соответствующее значение коэффициента f . Стереогаммы (б, г) анализируемых распределений направления характеристической компоненты намагниченности в каждом разрезе (уровень образцов).

Окский съезд

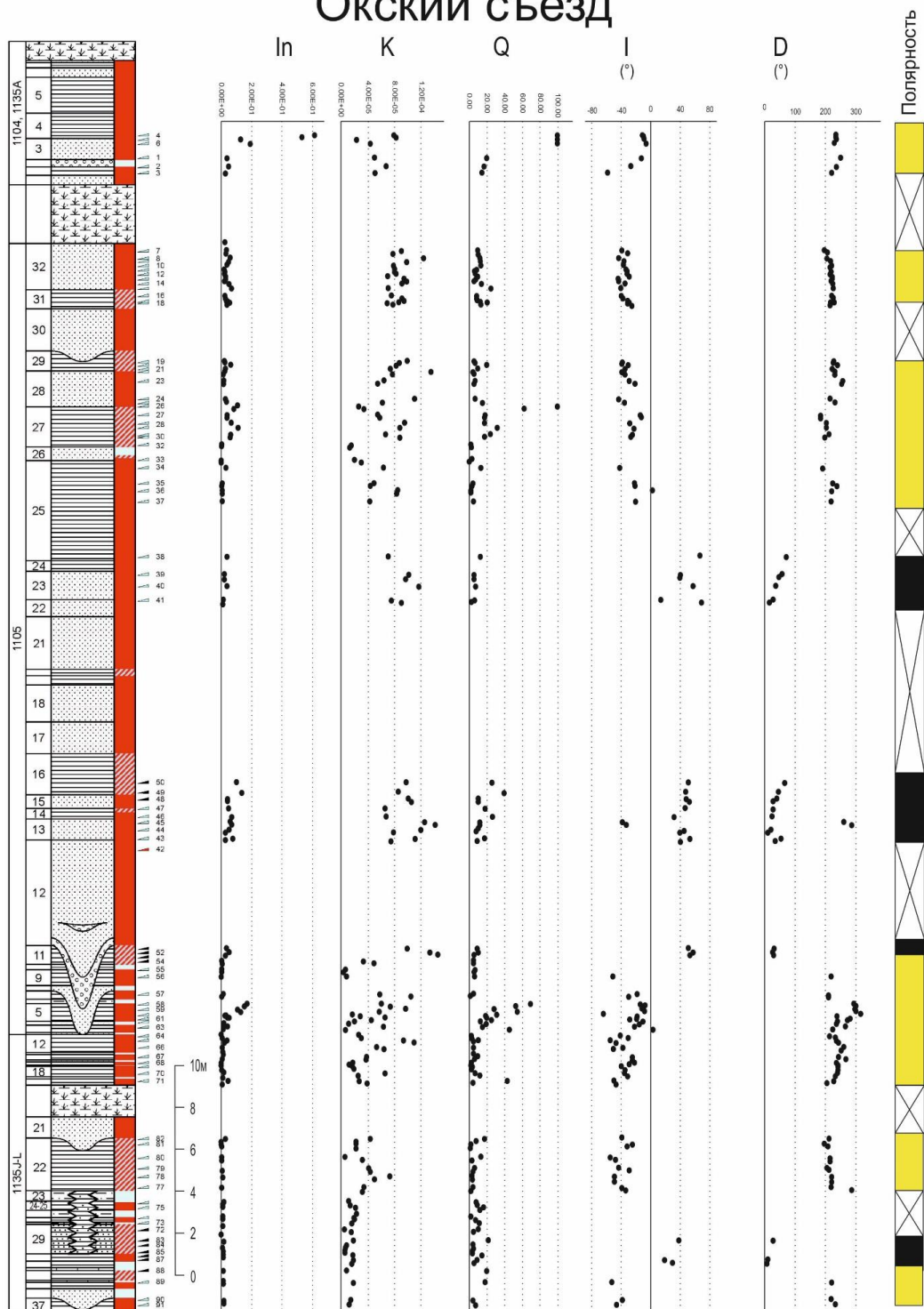


Рисунок 1.3.4.3. Пример магнитостратиграфической схемы и колонок петромагнитных параметров, составляемых для изученных разрезов на примере разреза Окский съезд (г.Нижний Новгород).

1.3.5. Создание итогового ГИС-проекта на основе полученных в ходе работ по проекту геологических, структурных, палеомагнитных, археомагнитных, геохронологических и других данных.

Цель работы состояла в создании ГИС-проекта для хранения и интерактивного анализа разнородных данных, полученных в ходе выполнения работ по проекту. При этом решались следующие задачи:

- 1) Разработка структуры ГИС-проекта, выраженной в формате атрибутивной таблицы.
- 2) Реализация базовой части ГИС-проекта, включая создание адаптивного интерфейса доступа к данным.
- 3) Сбор данных и наполнение ГИС-проекта.

Геоинформационная система (ГИС) — это многофункциональная система, предназначенная для сбора, обработки, моделирования и анализа пространственных данных, их отображения и использования при решении задач, подготовки и принятия решений в рамках предприятия/организации, а также для интеграции в различные сайты и общественные порталы (СКАНЭКС 2016). ГИС-проект, создаваемый в археомагнитной лаборатории в рамках данного Проекта, разрабатывается с использованием последних методических достижений в данной области и призван существенно упростить доступ и анализ данных, полученных за последние 3 года в результате мультидисциплинарных палеомагнитных, археомагнитных, геохронологических, геологических и других исследований по Проекту.

ГИС-проект создается на основе современной и завоевывающей все большую популярность в геоинформатике WEB-платформы – ArcGIS Online. Это не только позволяет обеспечить простой и кроссплатформенный доступ к проекту через стандартный веб-браузер, не требуя от пользователя установки дополнительного ресурсоемкого программного обеспечения, но и дает возможность неограниченного расширения и модификации структуры проекта и пополнения его новыми данными с участием авторизованных участников Проекта.

В рамках Проекта была проанализирована информация о работе двух основных WEB-платформ: ScanEx WEB GeoMixer® и ArcGIS Online. Первая платформа разработана российской компанией СКАНЭКС. Она доступна с любого компьютера и позволяет решать задачи государственных и бизнес-структур по территориальному управлению и реализации индивидуальных пользовательских проектов. Вторая платформа разработана

американской компанией ESRI, которая также, как и первая, включает в себя множество рабочих функций и возможности обработки данных и проведения дальнейшего пространственного анализа.

Наш выбор был остановлен на ArcGIS Online, в связи с тем, разработка и оформление ГИС-проекта была осуществлена в клиентском приложении ArcMap 10.1 (ArcGIS for Desktop). С помощью ArcCatalog ArcGIS for Desktop или ArcGIS Server Manager были созданы основные слои проекта.

Данные проекта были размещены на графических подложках (рис. 1.3.5.1.):

1) Тектоническая карта – тематический слой-подложка, содержащий сведения о размещении площадных и линейных тектонических объектов с привязанной к ним атрибутивной информацией о типе структуры и ее возрасте. Базовый масштаб данного сервиса: 1:25 000 000.

2) Базовая карта – «World Imagery» - Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community.

Проанализированные первичные данные от исполнителей проекта подгружались в основной файл проекта. Вся информация в разрабатываемом ГИС-проекте представлена в единой географической системе координат WGS_1984 (система координат: GCS_WGS_1984, датум: D_WGS_1984, сфероид: WGS_1984). Данные располагаются в виде отдельных шейп-файлов (рис. 1.3.5.2.).

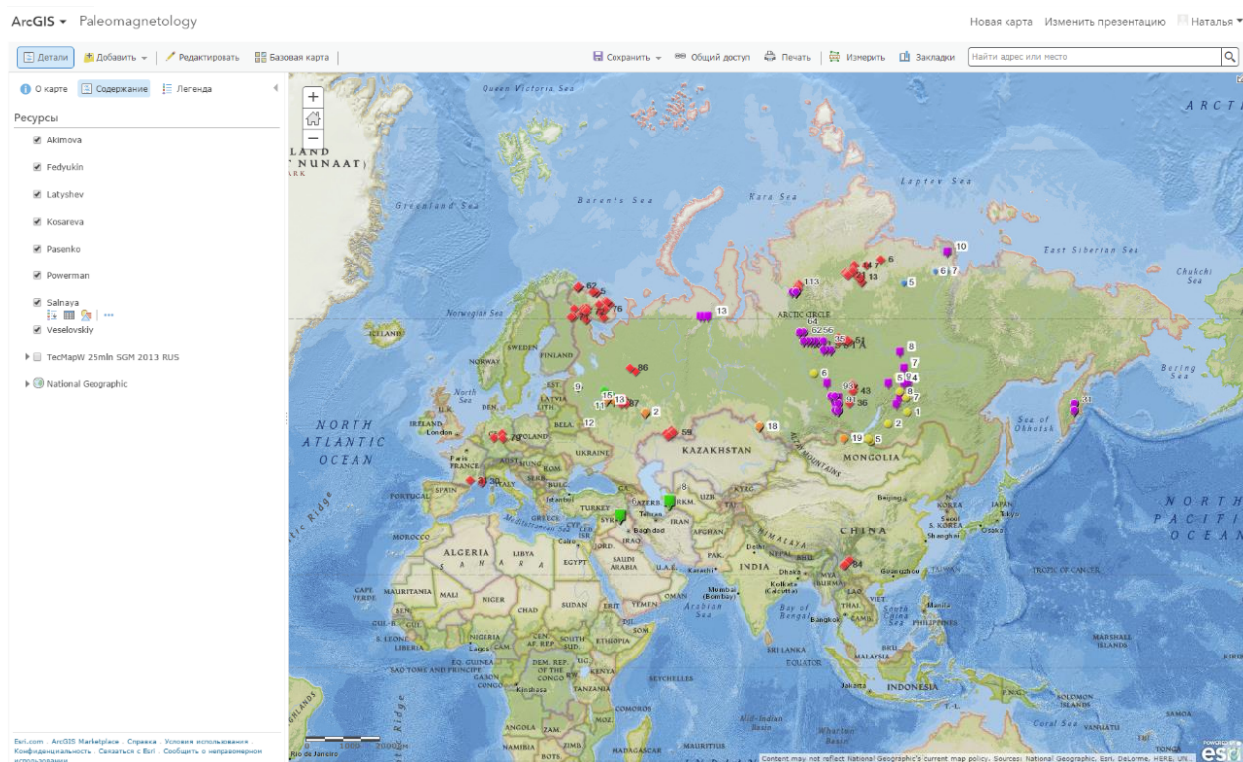


Рисунок 1.3.5.1. Главное окно ГИС-проекта.

На созданной карте отображается описание объектов, которое настраивается для отображения во всплывающих окнах. Всплывающие окна отображают атрибуты, связанные с каждым векторным слоем карты, таким как фотографии, координаты или публикации, а также вложения, изображения и диаграммы и ссылки на внешние веб-страницы (рис. 1.3.5.3.).

Выводы

Разработан, создан и активно пополняется данными интерактивный ГИС-проект, доступный в сети Интернет по адресу: <http://arcg.is/2iJZrwh>, который позволяет участникам проекта эффективно и в интерактивной форме анализировать и хранить полученные результаты.

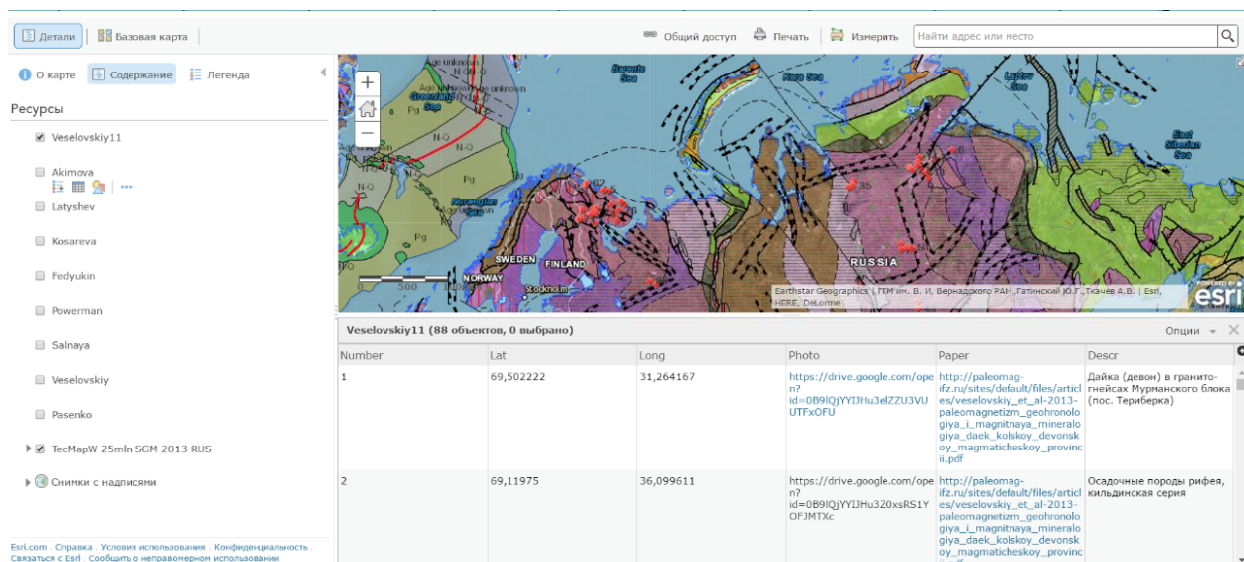


Рисунок 1.3.5.2. Основное окно проекта интерактивной карты с тектонической подложкой.

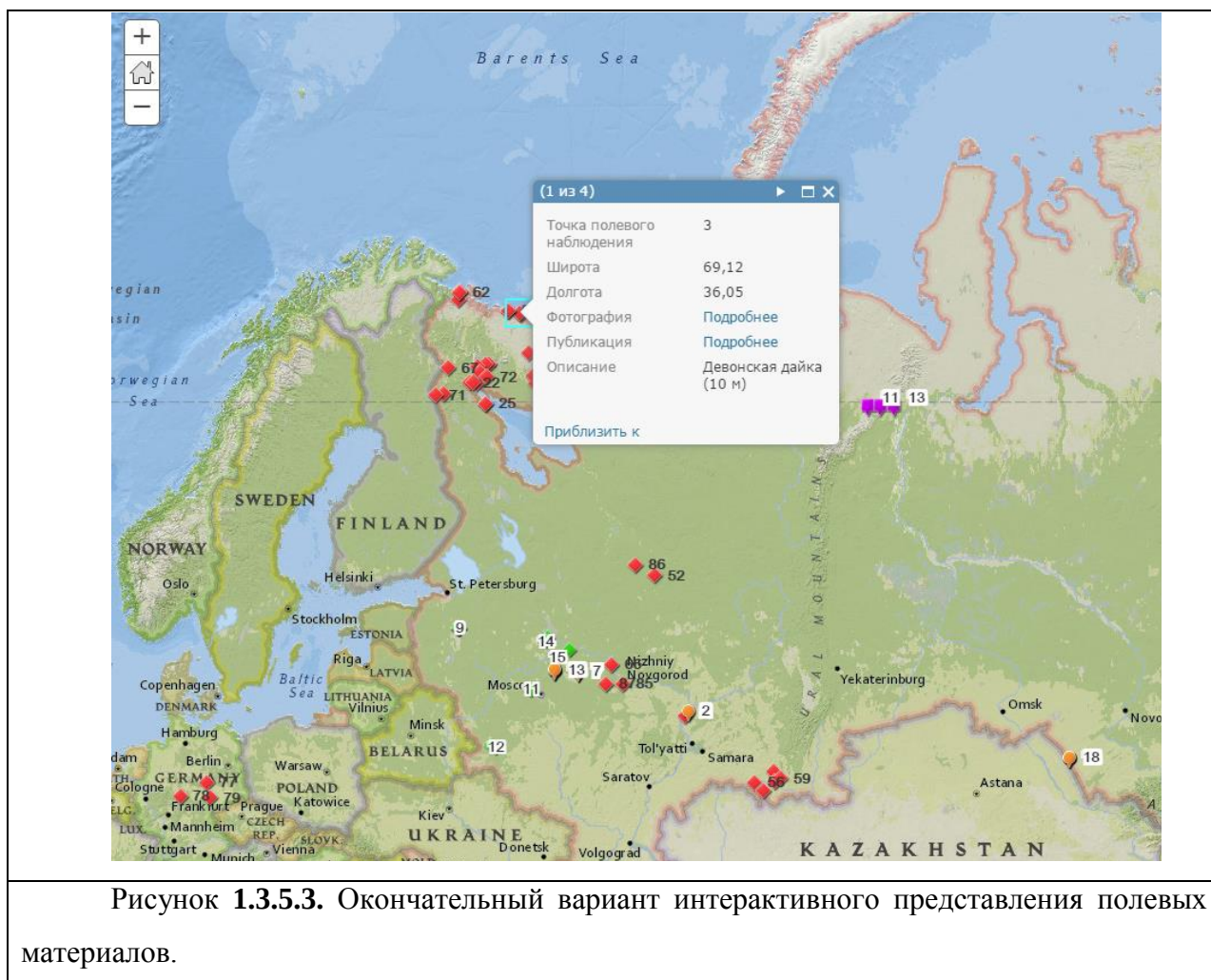


Рисунок 1.3.5.3. Окончательный вариант интерактивного представления полевых материалов.

1.3.6. Разработка методов диагностики природы остаточной намагниченности в осадочных породах: Синтез основных Fe- содержащих минералов красноцветов с варьируемым размером зерен при различных условиях соосаждения.

При палеомагнитных исследованиях осадочных пород красноцветные отложения являются одним из наиболее перспективных объектов. Достаточно часто эти породы обладают стабильной ясной палеомагнитной записью, отражающей направление магнитного поля времени их образования. В то же время, нередки случаи, когда палеомагнитная запись может иметь метахронный характер, т.е. формироваться не в момент образования осадочной породы, а на каком-то этапе ее жизни, что может быть связано, например, с наложенными прогревами, с изменениями химизма среды, с дегидратацией первичных гидроокислов и переходом их в гематит. Одним из наиболее важных гидроокислов, часто встречающихся в осадочных породах, в том числе, в красноцветах, является гетит.

Образование и преобразование гетита являются одними из наиболее важных процессов, приводящих к формированию естественной остаточной намагниченности красноцветов. Поэтому изучение магнитных свойств гетита, его условий образования и преобразования имеет принципиальное значение для диагностики гетита и для расшифровки палеомагнитного сигнала, записанного в красноцветах. Эти задачи могут решаться при изучении образцов синтезированных гетитов.

Цель настоящего исследования состояла в определении факторов, влияющих на свойства синтезированных гетитов, и, соответственно на свойства ансамблей гематитовых зерен, которые могут образовываться при преобразованиях гетитов и являться основными носителями древней намагниченности в красноцветах.

Влияние поверхностно-активных веществ (ПАВ) на свойства продуктов синтеза гетита.

Для диагностики тонкодисперсного гетита и выявления динамики формирования его магнитных свойств в осадочных породах требуется предварительное изучение искусственно синтезированных наночастиц.

Размеры частиц гетита и способ синтеза существенно влияют на его магнитные характеристики, а также на процесс дегидратации гетита при нагревании и свойства получа-

емого гематита. Поэтому, в частности, для постановки корректных экспериментов требуется получение наночастиц гетита с узким распределением по размерам зерен.

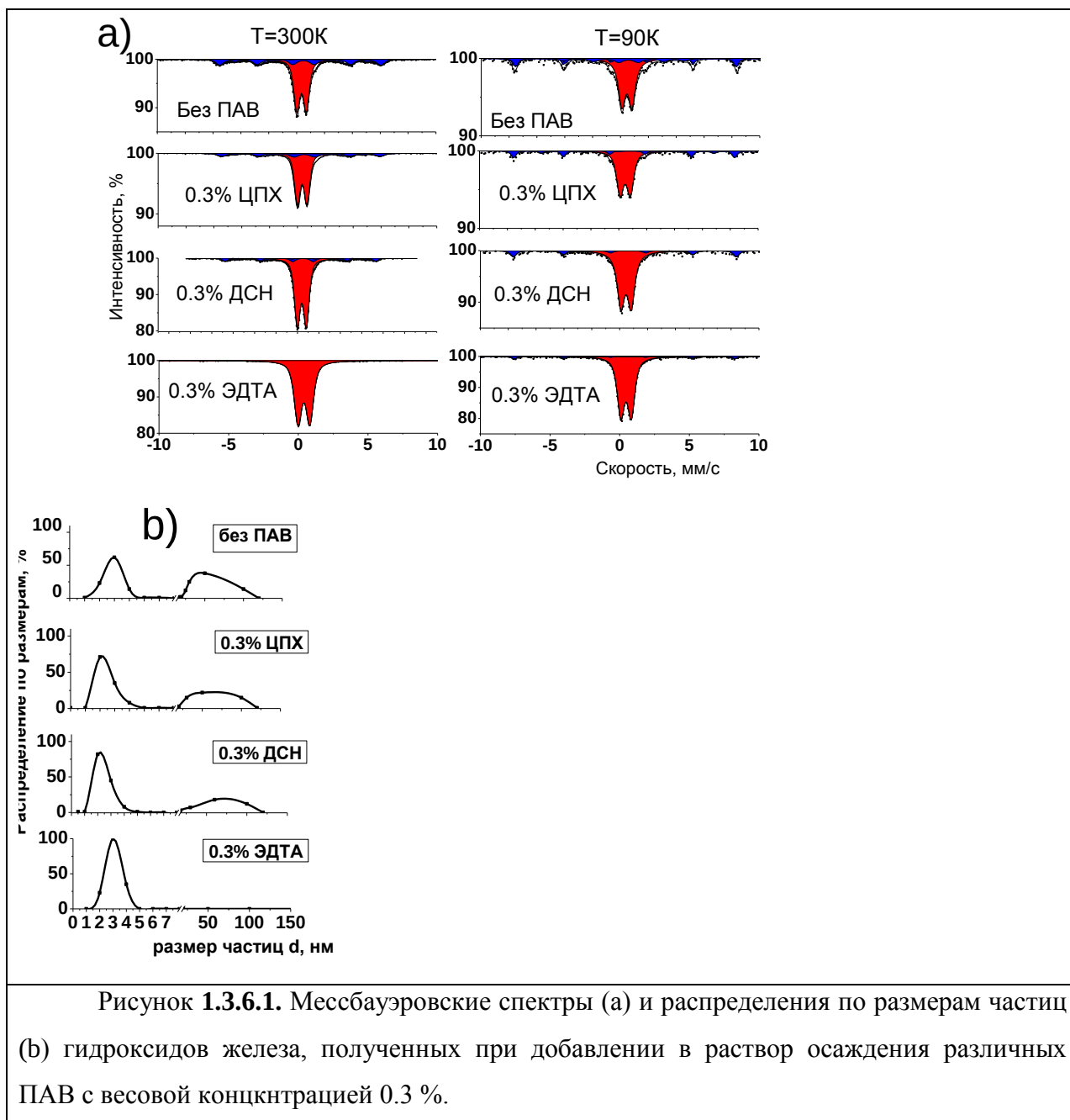
Для получения частиц заданной дисперсности необходимо вовремя остановить их рост. Одним из способов получения наночастиц нужной дисперсности является добавление в раствор ПАВ, которые, как предполагается, образуют на поверхности частиц защитный слой и тем самым уменьшают свободную поверхностную энергию. При этом, поверхностно-активные вещества могут влиять не только на размер, но и на магнитные свойства синтезированного гетита, а также приводить к формированию дополнительных магнитных фаз. Таким образом, возникает вопрос о том, как присутствие поверхностно-активных веществ в процессе синтеза гетита может отражаться на составе и свойствах получаемых магнитных соединений.

Задача данного модельного исследования состояла в изучении особенностей магнитных свойств наноразмерного α -FeOOH, соосаждённого из раствора соли хлорида железа FeCl_3 щёлочью NaOH в присутствии различных поверхностно-активных веществ (ПАВ).

При решении этой задачи с помощью мессбауэровской спектроскопии (рис. 1.3.6.1.) была сделана оценка размеров частиц гетита, полученного при применении различных ПАВ. В ходе проведенных экспериментов было показано, что если в случае синтеза без применения ПАВ доля невзаимодействующих наночастиц с размерами $<13\text{nm}$ составляет 60%, то при использовании поверхностно-активных веществ ЦПХ и ДСН эта доля увеличивается до 70 и 80 %. При применении поверхностно-активного вещества ЭДТА (этилендиаминтетрауксусной кислоты) в качестве ПАВ эта доля близка к 100%, что, очевидно, делает этот ПАВ наиболее эффективным для синтеза зерен гетита данной размерности.

Мессбауэровская спектроскопия также подтвердила, что при таком синтезе формируются зерна с бимодальным размерным распределением: к первой моде относятся частицы с размером менее 5 нм, ко второй – более крупные частицы с размером более 18 нм.

Изучение продуктов синтеза под электронным микроскопом показало, что мелкие (первые наномикроны) частицы плохо окристаллизованы, вероятно, имеют аморфное строение. Электронная микроскопия также показала наличие некоторого количества крупных игольчатых структур гетита (размерами 50 – 100 нм длиной и 10-20 нм толщиной).



Синтезированные образцы были изучены также при помощи терромагнитного анализа (ТМА). Этот анализ показал, что при применении выше названных ПАВ в наночастицах гетита наблюдаются особенности, связанные не только с размерными эффектами, но и с активной сорбционной способностью их поверхности.

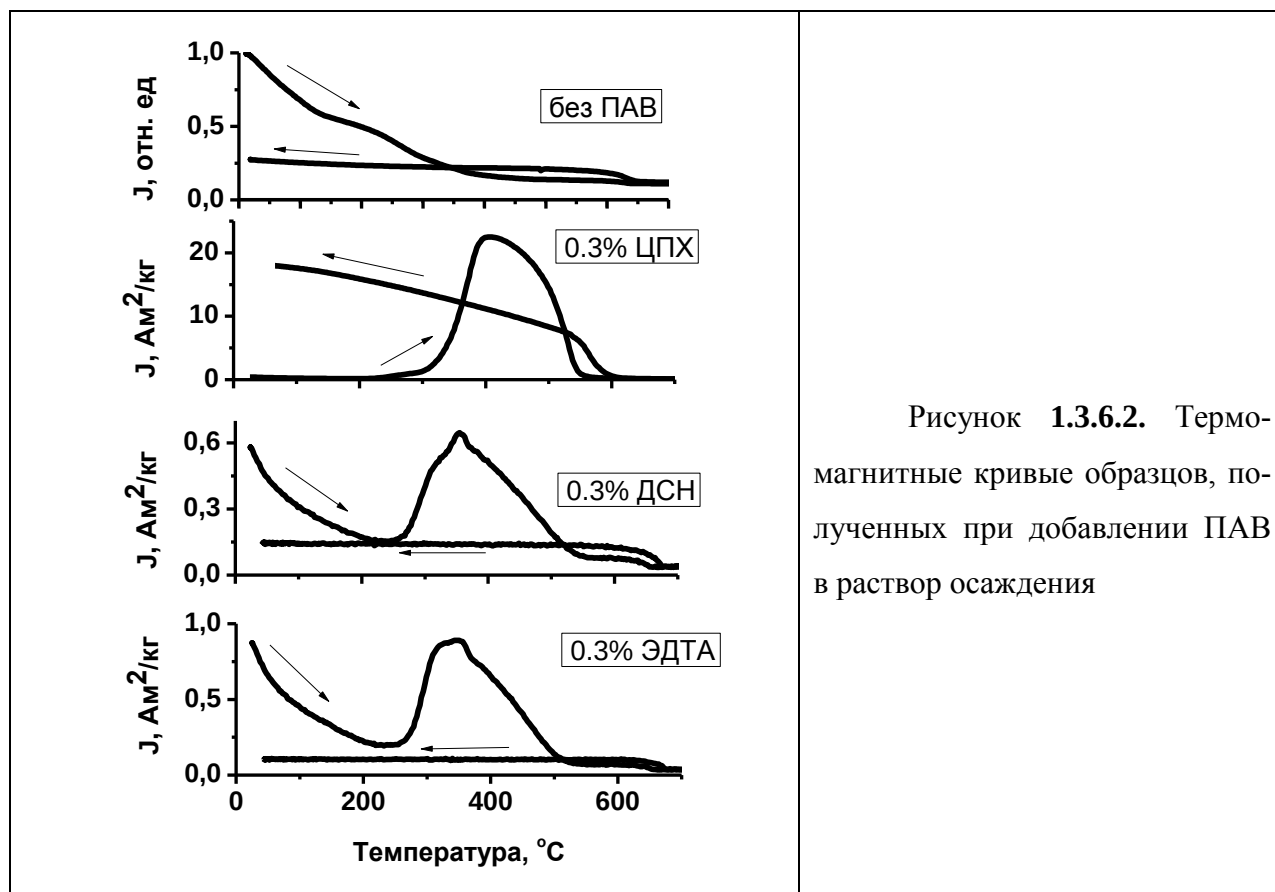


Рисунок 1.3.6.2. Термомагнитные кривые образцов, полученных при добавлении ПАВ в раствор осаждения

Термомагнитная зависимость $J(T)$ образца, полученного без ПАВ, имеет форму (рис. 1.3.6.2.), характерную для суперпарамагнитных частиц гидроксида железа. Выпуклая часть на термомагнитной кривой в диапазоне температур 130-300°C соответствует превращению $\alpha\text{-FeOOH} \rightarrow \alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, что свидетельствует о снижении температуры этого перехода по сравнению с массивным состоянием вещества.

Было обнаружено, что для образцов, полученных при добавлении ПАВ в раствор, на термомагнитных кривых, измеренных в атмосфере с доступом кислорода, появляются пики намагниченности. Эти пики свидетельствуют об образовании сильномагнитных фаз Fe_3O_4 , которая появляется при нагревании $\alpha\text{-FeOOH}$ только в восстановительной атмосфере. Наиболее сильный эффект наблюдается для образца, осажденного при добавлении 0.3% ЦПХ в раствор. После нагрева до 250°C появляется пик намагниченности с максимальным значением $J=22,8\text{ Ам}^2/\text{кг}$. Точка Кюри образовавшегося соединения, равная 550°C, соответствует фазе $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, которая обычно появляется при нагревании $\gamma\text{-FeOOH}$. Появление этой фазы, по-видимому, произошло в результате адсорбции на поверхности зародышевых слабоупорядоченных частиц гидроксида железа не только катионов ЦПХ, но и связанных с ними ионов хлора, которые могут образовывать микрозоны с низким значением уровня pH, способствующим формированию фазы $\gamma\text{-FeOOH}$.

Таким образом, за счет исключительной чувствительности ТМА к магнитным фазам и фазовым магнитным переходам, удалось установить, что за счет применения ПАВ в процессе синтеза, система становится неомогенной: большую ее часть составляют наночастицы гетита, однако присутствуют и некие дополнительные метастабильные фазы, расположенные на поверхности частиц гетита, испытывающие при нагреве на воздухе необратимые фазовые переходы с образованием сильномагнитных соединений.

Так, в случае применения ЦПХ в качестве ПАВ было предположено присутствие лепидокрокита наряду с гетитом, в случае с ДСН к основной фазе гетита добавляется тонкодисперсный пирит, а при использовании ЭДТА в качестве ПАВ образуется комплекс Fe(III) с ЭДТА.

Гистерезисные магнитные характеристики синтезированных осадков и их стабильность.

Гистерезисные магнитные свойства в значительной степени определяют стабильность приобретаемой минералом намагниченности. Поэтому, в рамках изучения гетита как носителя намагниченности красноцветов, важным шагом было исследование его гистерезисных характеристик.

В работе основное внимание было уделено гистерезисным магнитным характеристикам наночастиц гетита. Все магнитные измерения проводились на магнетометре VFTB EM в ГО «Борок». Термомагнитные кривые нагрева и охлаждения были измерены в интервале температур 20-700- 20°C в поле 400мТ. Петли гистерезиса были получены при комнатной температуре в магнитном поле от 0 до 1Т, по этим измерениям были определены величины намагниченности насыщения, остаточной намагниченности, коэрцитивной силы и остаточной коэрцитивной силы- характеристики, в которых может отразиться влияние различия в ПАВ на магнитные свойства наночастиц гетита в исходном состоянии, а также на процесс его дегидратации и магнитные характеристики получаемых в результате этого процесса частиц гематита

Гистерезисные параметры были измерены для трёх состояний образцов: 1) исходное; 2) метастабильное (после нагрева до пика намагниченности на кривой ТМА и последующего охлаждения до комнатной температуры); 3) конечное (после нагрева до 700°C и последующего охлаждения).

Петли гистерезиса всех образцов в исходном состоянии представляют собой прямые линии с различным наклоном (рис. 1.3.6.3.). Такие зависимости характерны для парамагнетиков и суперпарамагнитных частиц. Следовательно, несмотря на присутствие относительно крупных частиц, основу синтезированных препаратов составляют наночасти-

цы гетита в суперпарамагнитном состоянии и присутствующие в качестве второй фазы парамагнитные соединения.

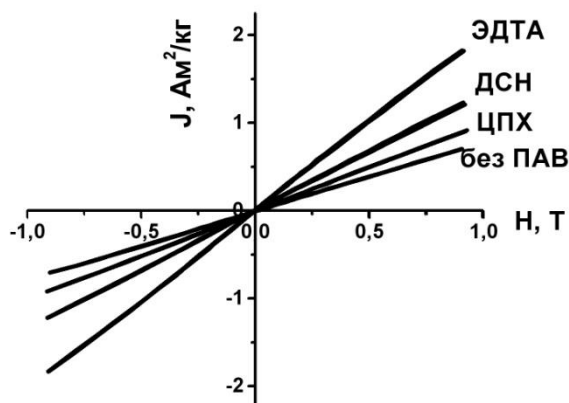


Рисунок 1.3.6.3. Зависимости намагниченности образцов (в исходном состоянии), синтезированных в присутствии различных ПАВ, в от поля.

Петли гистерезиса для образцов, нагретых до температуры пика намагниченности и затем охлаждённых до комнатной температуры (рис. 1.3.6.4.) существенно отличаются от петель исходного состояния и друг от друга. Видно, что метастабильные фазовые состояние образцов, синтезированных с применением разных ПАВ, сильно различаются по величинам остаточной намагниченности и намагниченности насыщения, а также по коэрцитивности.

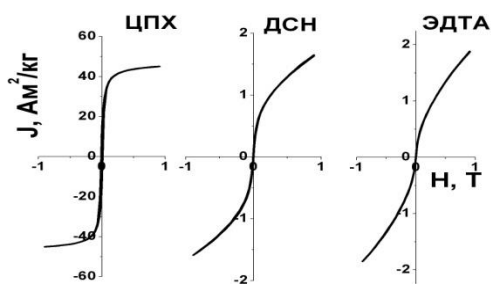
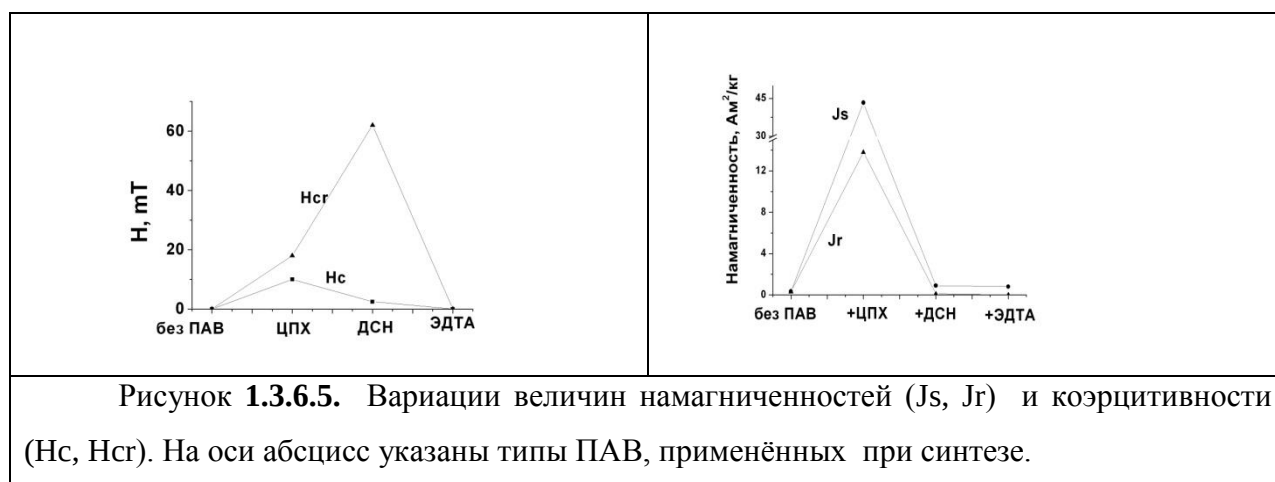


Рисунок 1.3.6.4. Петли гистерезиса (вверху) образцов, нагретых до температуры пика намагниченности и затем охлаждённых до комнатной температуры- метастабильное состояние; вариации величин намагниченностей (J_s , J_r) и коэрцитивности (H_c , H_{cr}).

"Замораживание" этих состояний было выявлено в ходе измерения термомагнитных кривых охлаждения и последующего нагрева.

В случае применения ЦПХ в интервале 250-500°C происходит фазовый переход в результате, которого образуется сильномагнитное ($J_s=43.3 \text{ Ам}^2/\text{кг}$, $J_r=13,8 \text{ Ам}^2/\text{кг}$) относи-

тельно магнитомягкое соединение ($H_c=10\text{ мТ}$, $H_{cr}=18\text{ мТ}$). По этим величинам, а также по температуре Кюри $T=550^\circ\text{С}$ можно сказать, в этом состоянии основной вклад в намагниченность даёт маггемит ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), который мог появиться при нагревании только за счет дегидратации лепидокрокита ($\gamma\text{-FeOOH}$), образовавшегося в этом образце в качестве второй фазы при синтезе. Петли гистерезиса метастабильного состояния наночастиц гетита, синтезированных с применением ДСН и ЭДТА, представляют собой сумму вкладов от ферромагнитной и парамагнитной (суперпарамагнитной) компонент. Вычисленные после вычитания пара\суперпарамагнитной составляющей величины J_s равны 0.11 и $0.07\text{ Ам}^2/\text{кг}$, соответственно. Остаточная намагниченность $J_r=0.05\text{ Ам}^2/\text{кг}$ в случае ДСН и $0.03\text{ Ам}^2/\text{кг}$ в случае ЭДТА. Параметры магнитной жесткости также различны для двух рассматриваемых случаев (рис. 1.3.6.5.), указывая на абсолютно разные метастабильные фазы, образовавшиеся во время синтеза наночастиц гетита.



Об этом же свидетельствуют и терромагнитные кривые этих метастабильных фаз, имеющих различные T_c и различные температуры необратимого разрушения.

Оценка интервалов значений гистерезисных параметров синтезированных Fe-содержащих минералов красноцветов.

Конечное состояние наночастиц гетита, полученное после нагрева как исходных, так и метастабильных образцов до 700°С , характеризуется полным разрушением метастабильных фаз и образованием однофазного гематита, что следует из рис. 1.3.6.4.. Вид кривых для всех образцов, синтезированных с применением различных ПАВ, соответствует аналогичным кривым для массивных гематитов различного происхождения. Небольшую долю тонкодисперсных частиц можно предположить только в образце, синтезированном без применения ПАВ. Очевидно, частицы гематита при лабораторных нагревах образуются значительно большего размера, чем исходные частицы гетита. Однако, несмотря на

близкую форму термомагнитных кривых и единственную $T_c=675^\circ\text{C}$, гистерезисные характеристики образовавшихся гематитов достаточно разнообразны. Петли гистерезиса образцов, нагретых до 700°C и затем охлаждённых, резко отличаются от петель исходного и метастабильного состояний, своей формой и шириной (рис. 1.3.6.6.).

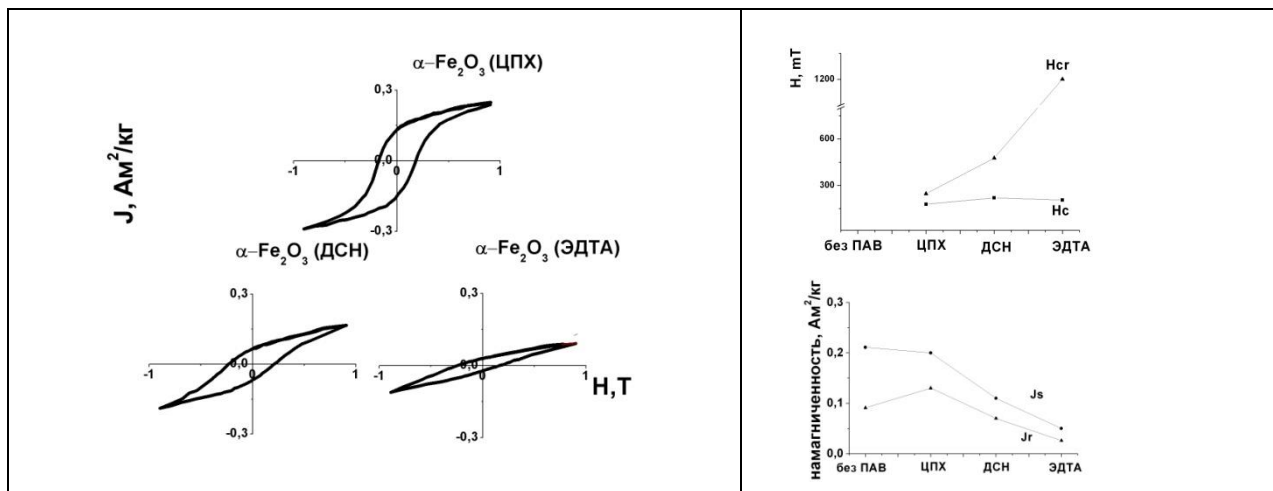


Рисунок 1.3.6.6. Петли гистерезиса образцов (слева), нагретых до 700°C и затем охлаждённых до комнатной температуры (конечное состояние); вариации величин намагниченностей (J_s , J_r) и коэрцитивности (H_c , H_{cr}) для полученных гематитов (справа).

Намагниченность всех образцов не достигает насыщения в поле 1Т, что не удивительно для магнитожёсткого гематита, однако величины намагниченности насыщения J_s не достигают значения $0.5\text{Am}^2/\text{kg}$, характерного для "массивного" гематита, и варьируют в пределах от $0.07\text{Am}^2/\text{kg}$ в случае использования ЭДТА в качестве ПАВ до $0.22\text{Am}^2/\text{kg}$ при применении ЦПХ, что близко к J_s образца, синтезированного без ПАВ. Аналогично, величины остаточной намагниченности также возрастают от значения $0.03\text{Am}^2/\text{kg}$ для ЭДТА до $0.08\text{Am}^2/\text{kg}$ в случае ДСН, но наибольшее значение $J_r=0.16\text{Am}^2/\text{kg}$ наблюдается у гематита, образованного с применением ЦПХ. Параметры коэрцитивности полученных гематитов также различаются: Их вариации обратны вариациям величин намагниченностей (рис. 1.3.6.5.). Наименее жесткий гематит получается после дегидратации гетита, полученного с применением ЦПХ, где в качестве дополнительной метастабильной фазы наблюдался маггемит: величины H_c и H_{cr} равны 178 и 246мТ соответственно. Наиболее магнитожёсткий гематит, образуется из нанопорошка гетита, синтезированного с применением комплексона ЭДТА в качестве ПАВ ($H_c=205\text{мТ}$, $H_{cr}=1200\text{мТ}$).

Выводы.

Таким образом, в проведенной работе показано, что поверхностно активные вещества, присутствующие в растворах при осаждении частиц гетита, не только стабилизируют наночастицы, замедляя процесс их кристаллизации и роста, но за счет сорбционных свойств гетита активно воздействуют на одновременное образование различных дополнительных фаз на поверхности. Это сказывается в изменении его стабильности, характере фазовых переходов и разнообразии магнитных свойств образующихся гематитов. Если сами наночастицы гетита, осажденные из природных растворов, на начальном этапе не приобретают химической остаточной намагниченности и не вносят вклада в NRM осадка, то их дальнейшее существование в осадке и естественная дегидратация могут способствовать на определенном временном интервале образованию не только различных гематитов химического происхождения, но и устойчивых метастабильных магнитных фаз, обладающих остаточной намагниченностью большей величины, чем у гематита, предшествующих его появлению. Такой процесс может рассматриваться как один из вероятных при образовании естественной остаточной намагниченности красноцветов.

1.3.7. Разработка и тестирование нового экспериментального протокола по определению напряженности магнитного поля для коллекций, где наблюдается сильное влияние скорости создания термоостаточной намагниченности на конечный результат определения палеонапряженности.

Определение палеонапряженности является трудной и трудоемкой задачей. В экспериментальных процедурах необходимо учитывать эффекты, связанные с созданием термоостаточной намагниченности: анизотропии термоостаточной намагниченности, скорости охлаждения; приводить доказательства термоманитной природы естественной остаточной намагниченности.

Используемый нами протокол Триакс [Le Goff, Gallet, 2004] позволяет минимизировать влияние такого рода эффектов, в процессе эксперимента также косвенно подтверждается природа намагниченности. Однако, при изучении некоторых археомагнитных коллекций мы столкнулись со значительным влиянием эффекта скорости охлаждения. В большинстве случаев, обычная процедура определения палеонапряженности, со скоростью создания лабораторной термоостаточной намагниченности 25 °C/мин, не позволяла получать результаты, соответствующие принятым для данного метода критериям.

Например, на рис. 1.3.7.1 а, с показан случай, когда синие кривые R' (отношение спадов естественной остаточной и лабораторной термоостаточной намагниченностей на данном интервале температур), из которых рассчитывается конечный результат напряженности древнего поля – вогнутые, и красные кривые R (отношение естественной остаточной намагниченности при данной температуре к лабораторной термоостаточной намагниченности при той же температуре), которые мы используем как вспомогательные, восходящие. В идеализированном случае, оба вида кривых должны быть прямолинейными и горизонтальными подобно тому, как это показано на рис. 1.3.7.1 b, d (эксперимент выполнялся при более низкой скорости).

Мы предположили, что наблюдаемое поведение кривых (рис. 1.3.7.1 а,с) связано с влиянием скорости охлаждения образцов при создании лабораторной термоостаточной намагниченности (скорости эксперимента). Для проверки этой гипотезы нами были проведены дополнительные исследования по созданию в заданном поле «псевдо» естественной остаточной намагниченности на образцах с различными скоростями охлаждения и последующему определению напряженности магнитного поля по используемому протоколу (Рис. 1.3.7.2).

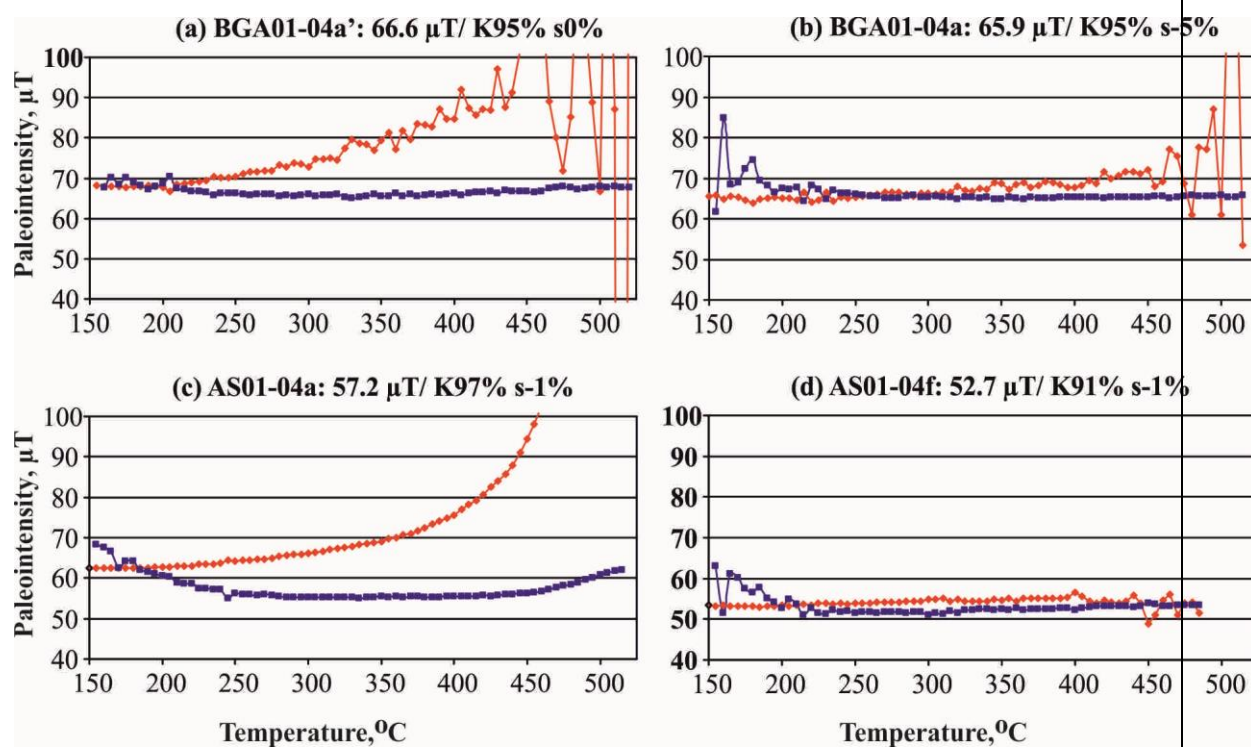


Рисунок 1.3.7.1. Примеры определения палеонапряженности на естественных образцах со скоростью 25 °C/мин (а,с) и 2 °C/мин (b, d). Красные (R) и синие (R') кривые показывают палеонапряженность, рассчитанную различными способами.

Результаты экспериментов показали систематическую зависимость полученных значений напряженности от скорости проведения эксперимента.

При изучении псевдоестественной остаточной намагниченности, созданной со скоростью 2 °C/мин, использование обычной процедуры (скорость охлаждения 25 °C/мин), показывает «аномальный» тип кривых (рис. 1.3.7.2а), подобный изображенным на рис. 1.3.7.1 а,с. Полученные при этом значения палеонапряженности оказываются завышенными.

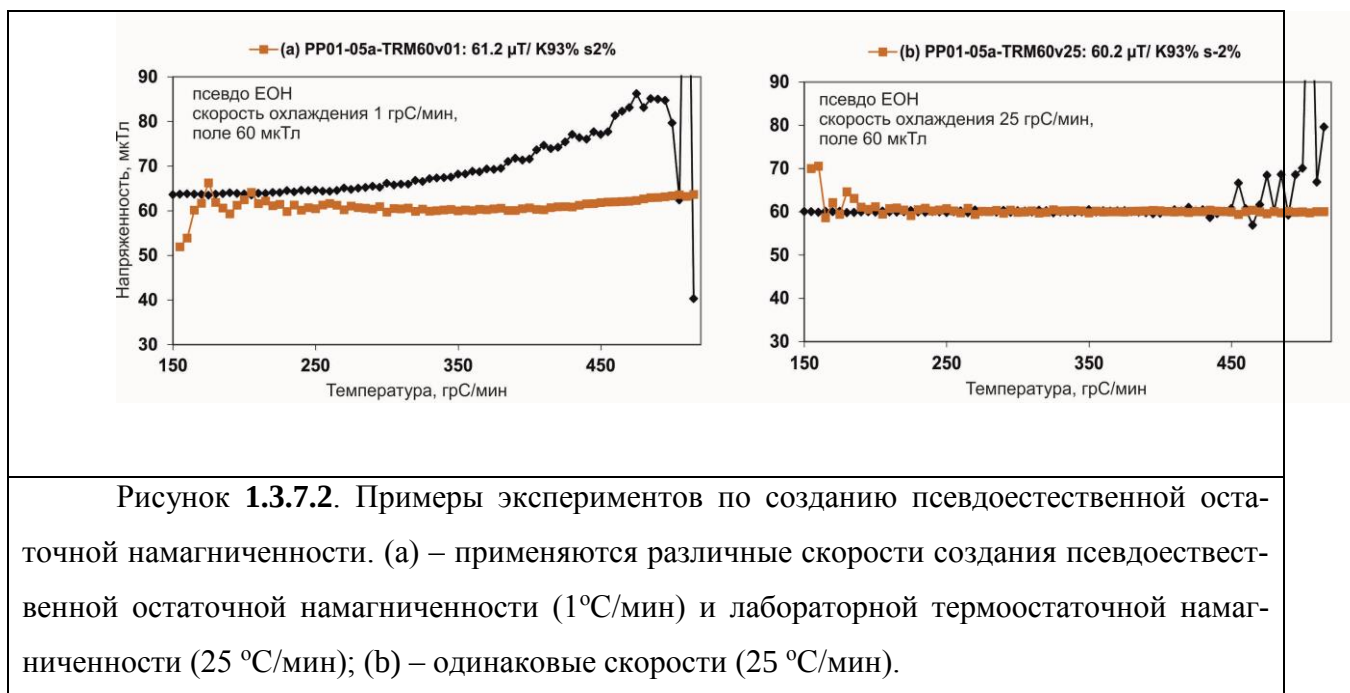


Рисунок 1.3.7.2. Примеры экспериментов по созданию псевдоестественной остаточной намагниченности. (а) – применяются различные скорости создания псевдоестественной остаточной намагниченности (1°С/мин) и лабораторной термоостаточной намагниченности (25 °С/мин); (б) – одинаковые скорости (25 °С/мин).

Итак, наши эксперименты показывают, что в тех случаях, когда скорость создания естественной остаточной намагниченности ниже скорости создания лабораторной термоостаточной намагниченности (скорости охлаждения образца в лабораторном поле), полученные значения палеонапряженности являются завышенными.

Дополнительно выполненные эксперименты также показали, что в случае, если скорость лабораторного эксперимента ниже скорости охлаждения изделия, из которого получены образцы, при его изготовлении, кривые R получаются нисходящими, а рассчитанные оценки палеонапряженности – заниженными.

Одним из путей решения данной проблемы явилась разработка и тестирование новой процедуры палеомагнитных исследований, предусматривающей скорость создания лабораторной термоостаточной намагниченности, приближенной к скорости охлаждения исследуемого изделия при его изготовлении.

Процедура предусматривает проведение исследований с низкой (2 °С/мин) скоростью в том же температурном интервале, что и при стандартных измерениях.

Результаты исследований с низкой скоростью охлаждения показывают более стабильное поведение кривых напряженности и в большинстве случаев гарантирует получение качественных результатов (Рис. 1.3.7.1. b,d).

Более того, протокол Triahe позволяет определить переоценку/недооценку влияния эффекта скорости охлаждения исходя из восходящего/нисходящего типа кривых R(T).

Последнее невозможно определить с помощью классического метода Телье и его модификаций и является преимуществом используемой нами методики.

Представляется, что использованный нами подход (оценка влияния скорости эксперимента на форму получаемых кривых при использовании протокола Triaxe) целесообразно широко внедрить в практику археомагнитных определений палеонапряженности, поскольку он обеспечивает получение качественных результатов независимо от степени достоверности сведений о скорости изготовления изделий, получаемых из исторических и археологических источников.

Другим путем решения проблемы является процедура, предусматривающая сокращение температурного интервала определения палеонапряженности при сохранении высокой скорости эксперимента. Влияние последней существенно сглаживается, за счет исключения части температурного интервала с наиболее сильным эффектом скорости охлаждения. Качество результатов такого рода экспериментов соизмеримо в пределах погрешностей с определением напряженности с низкой скоростью охлаждения. Однако, существенным плюсом является сокращение времени эксперимента.

Предложенная методика была апробирована на естественных образцах при исследовании древней напряженности геомагнитного поля по археомагнитным коллекциям Центральной части России. Для исключения влияния эффекта скорости охлаждения использовались как низкая скорость эксперимента, так и сокращение температурного интервала исследований. При этом для отбора качественных результатов использовались стандартные критерии. Результаты выполненных исследований показали хорошее соответствие данных (менее 5%), получаемых разными разработанными нами версиями процедуры.

Блок 2: Построение опорных кривых палеовековых вариаций геомагнитного поля для различных регионов России и разработка глобальной модели магнитного поля голоцена

2.1. Реконструкция палеовековых вариаций элементов геомагнитного поля на территории Европейской части России по данным исследования колонок донных отложений современных озер.

Актуальность.

Изучение вариаций ГМП является фундаментальной задачей, которая дает ответы на вопросы, связанные, как с эволюцией внутренних оболочек нашей планеты, так и с изменениями условий (в частности, климатических) на ее поверхности [Bloxham et al., 1989]. Источниками информации об изменениях магнитного поля последних веков и тысячелетий служат обсерваторские наблюдения, исторические данные и археологические объекты (обожжённые глины). Последние, как правило, очень дискретны, но позволяют получить достаточно точные значения элементов древнего геомагнитного поля. Записи палеовековых вариаций геомагнитного поля в донных отложениях современных озер (лимномагнитные данные) позволяют получить практически непрерывную запись изменений параметров ГМП и наиболее достоверно реконструировать морфологию вариаций элементов геомагнитного поля, хотя сами абсолютные значения склонения, наклонения и палеонапряженности могут быть искажены.

В начале 70-х годов прошлого века было показано, что палеовековые вариации ГМП можно успешно реконструировать по исследованиям отложений современных озер [Creer et al., 1972]. Впоследствии аналогичные исследования были выполнены в Западной и Центральной Европе, в Африке, в Северной и Южной Америке, в Австралии [Thouveny et al., 1990; Turner et al., 1981; Ali et al., 1999; Creer et al., 1983; Gogorza et al., 2000 и др.], России [Крайнов и др., 2013 и др.]. Эти данные позволили установить наиболее общие качественные закономерности вариаций направления вектора ГМП практически на всех континентах. Использование современных технологий позволяет получить количественные оценки вариаций ГМП по лимномагнитным данным: использование соответствующих технологий для выбора мест отбора колонок, аккуратный отбор образцов, исключения факторов приводящих к дополнительным искажениям палеомагнитных данных – экранировка от внешнего магнитного поля при отборе, транспортировке и хранении об-

разцов. Полученные таким образом лимномагнитные данные позволят в комплексе с археомагнитными, историческими и обсерваторскими данными получить адекватные модели вариаций ГМП в последние тысячелетия.

Цели и задачи.

Цель настоящих исследований состояла в реконструкции характера вариаций элементов геомагнитного поля в европейской части России по лимномагнитным данным, а также в совершенствовании технологий отбора колонок, отбора образцов, хранения, измерения их палеомагнитных и петромагнитных параметров и математической обработки результатов измерений для реконструкции вариаций элементов ГМП с максимальной возможной достоверностью.

Для достижения поставленной цели, нами были решены следующие задачи:

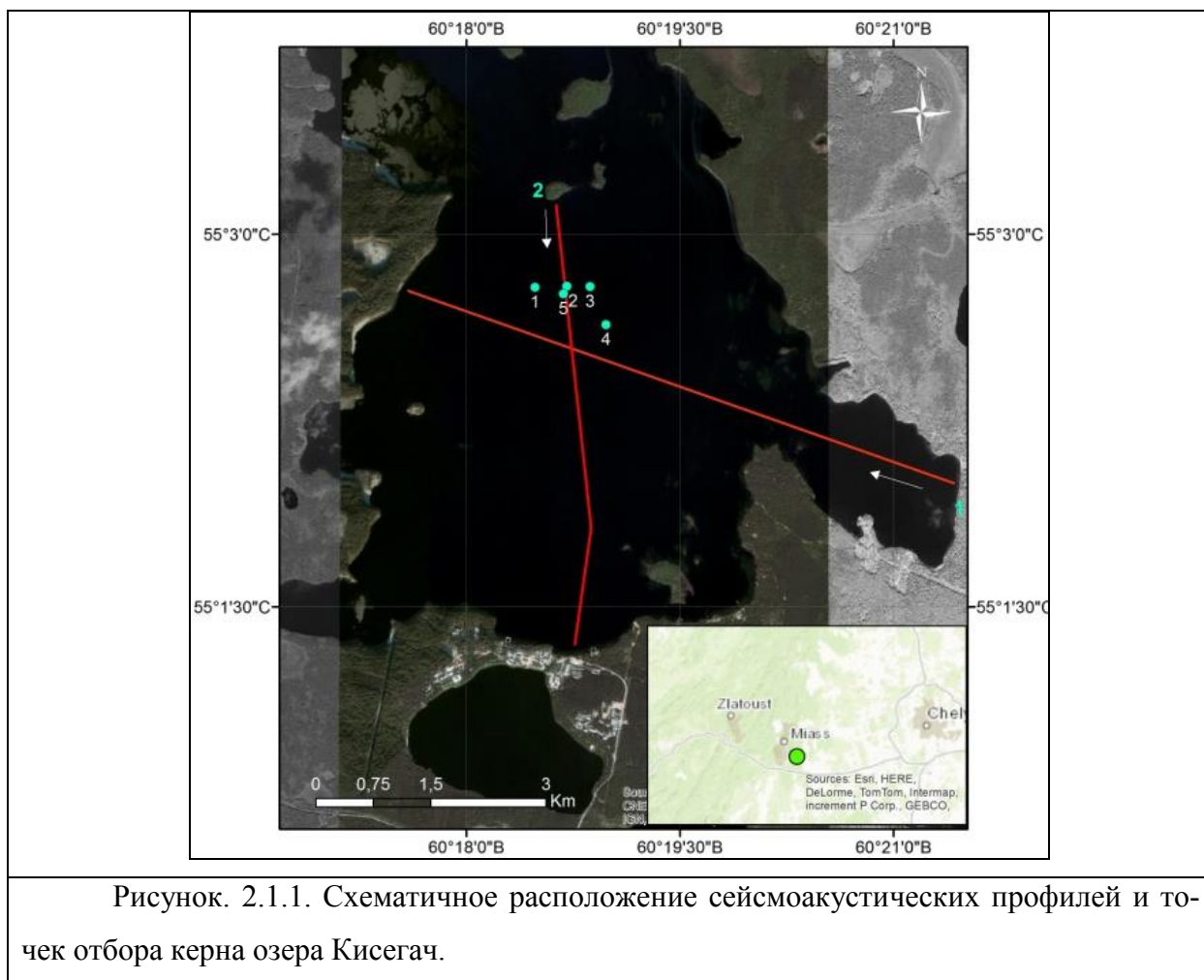
- Выбор озер, в которых возможно обнаружение донных отложений с наибольшей скоростью накопления и отсутствием перерывов и мощных придонных течений,
- Выбор мест оптимального отбора колонок донных отложений для лимномагнитных исследований (полнота разреза, отсутствие газовых потоков, антропогенных нарушений осадка) на основе детальных сейсмоакустических исследований;
- Бурение и отбор колонок донных отложений, отбор образцов с использованием специального пробоотборника позволяющего не деформировать полужидкие образцы;
- Перевозка и хранение образцов до измерений, измерение образцов с использованием крио-магнитометра, выбор режимов магнитной очистки, выделение компонент намагниченности, несущих информацию о геомагнитном поле времени накопления осадков;
- Корреляция и суммирование колонок по одному озеру, создание мастер-кривой вариаций лимномагнитных параметров с оценкой значимости изменений для каждого озера
- Корреляция лимномагнитных мастер-кривых в регионе, создание региональных мастер-кривых вариаций лимномагнитных параметров
- Измерение и анализ петромагнитных параметров, чувствительных к изменениям климата и окружающей среды в целом, оценка изменения условий осадконакопления в локальном и региональном плане;

- Сопоставление полученных мастер-кривых с уже известными лимномагнитными и археомагнитными данными по Восточной, Западной Европе и другим регионам Земли.
- Качественное описание характера вариаций компонентов ГМП в региональном и глобальном планах, использование данных для построения глобальных моделей по комплексу данных.

Методы и объекты исследований.

Анализ опубликованных и ранее полученных нами данных выявил перспективные объекты исследований. На основе этого анализа была выбрана группа озер, на которых были проведены сейсмоакустические исследования. Эти работы показали, что из всех изученных озер, наиболее перспективными объектами, где наилучшим образом могла сохраниться палеомагнитная запись, являются озера Плещеево (Ярославская область) - экспедиция 2014г., Рубское (Ивановская область) - экспедиция 2015г., Кисегач (Челябинская область) - экспедиция 2016г., Кандрыкуль (Республика Башкортостан) - собрана и исследована коллекция образцов в 2016г. Эти озера и стали объектом дальнейших детальных лимномагнитных исследований.

Лимномагнитные исследования проводились на основе системы технологического обеспечения палеомагнитного изучения озерных осадков, разработанной в Казанском университете [Nourgaliev et al., 2003]. Система включает в себя: а) аппаратно-методический комплекс для высокоточного отбора керна и подготовки коллекций ориентированных образцов различного типа озерных отложений; б) оптимальную систему магнито-минералогических и палеомагнитных исследований озерных отложений; в) технологию опережающих сейсмоакустических исследований донных отложений современных озер. Эффективность системы опробована на более чем десятке озер на территории Центральной России, Белоруссии и Казахстана.



Озеро Большой Кисегач. Кисегач самое большое озеро в Чебаркульском районе (рис. 2.1.1.), объем воды составляет 268 млн. м³. Максимальная глубина – 35 м, средняя глубина 15 м., площадь зеркала воды 14 км², площадь водосбора 114 км². Котловина озера тектонического происхождения. Отобрано 5 керновых колонок донных отложений мощностью от 4.6 до 5.3 м. Палеомагнитные исследования проведены по 4 кернам. Расположение сейсмических профилей и точек отбора керна отображено на рис. 2.1.1.

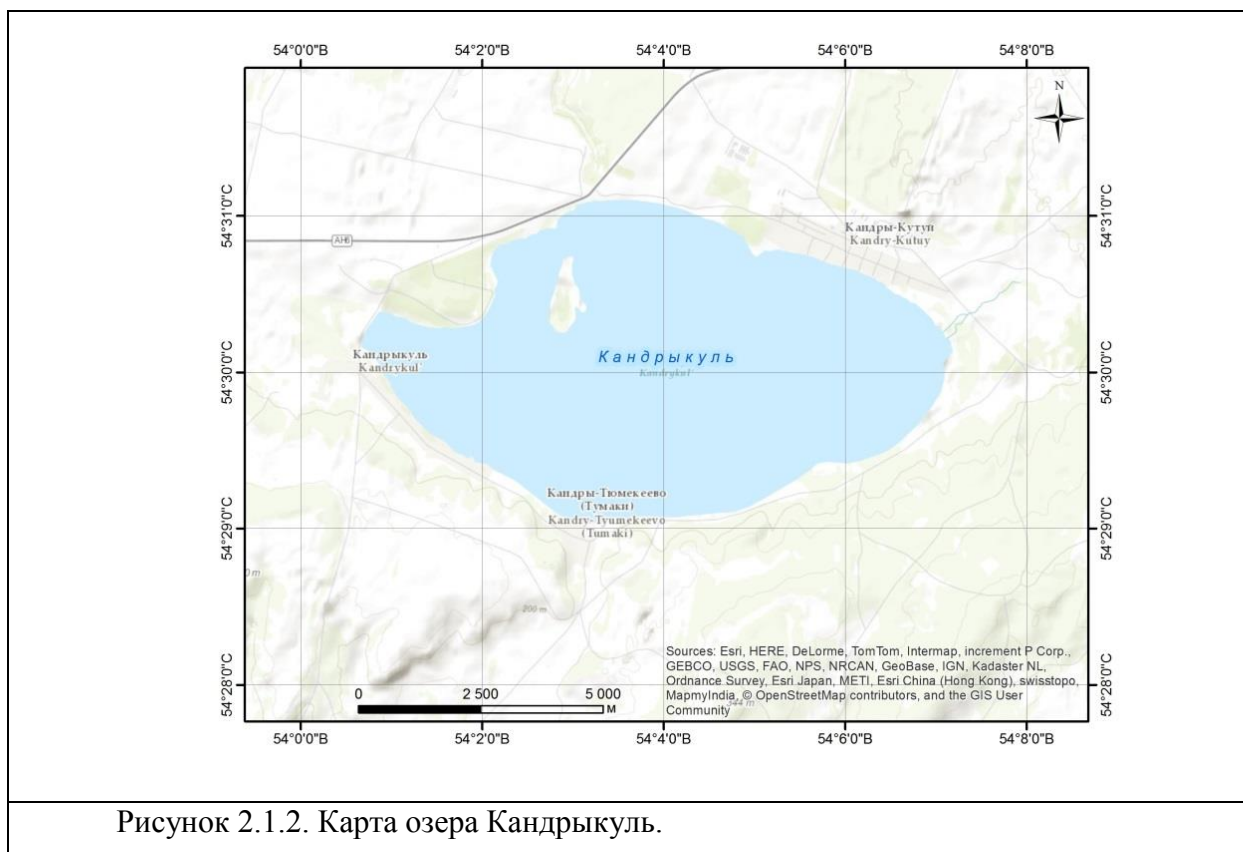
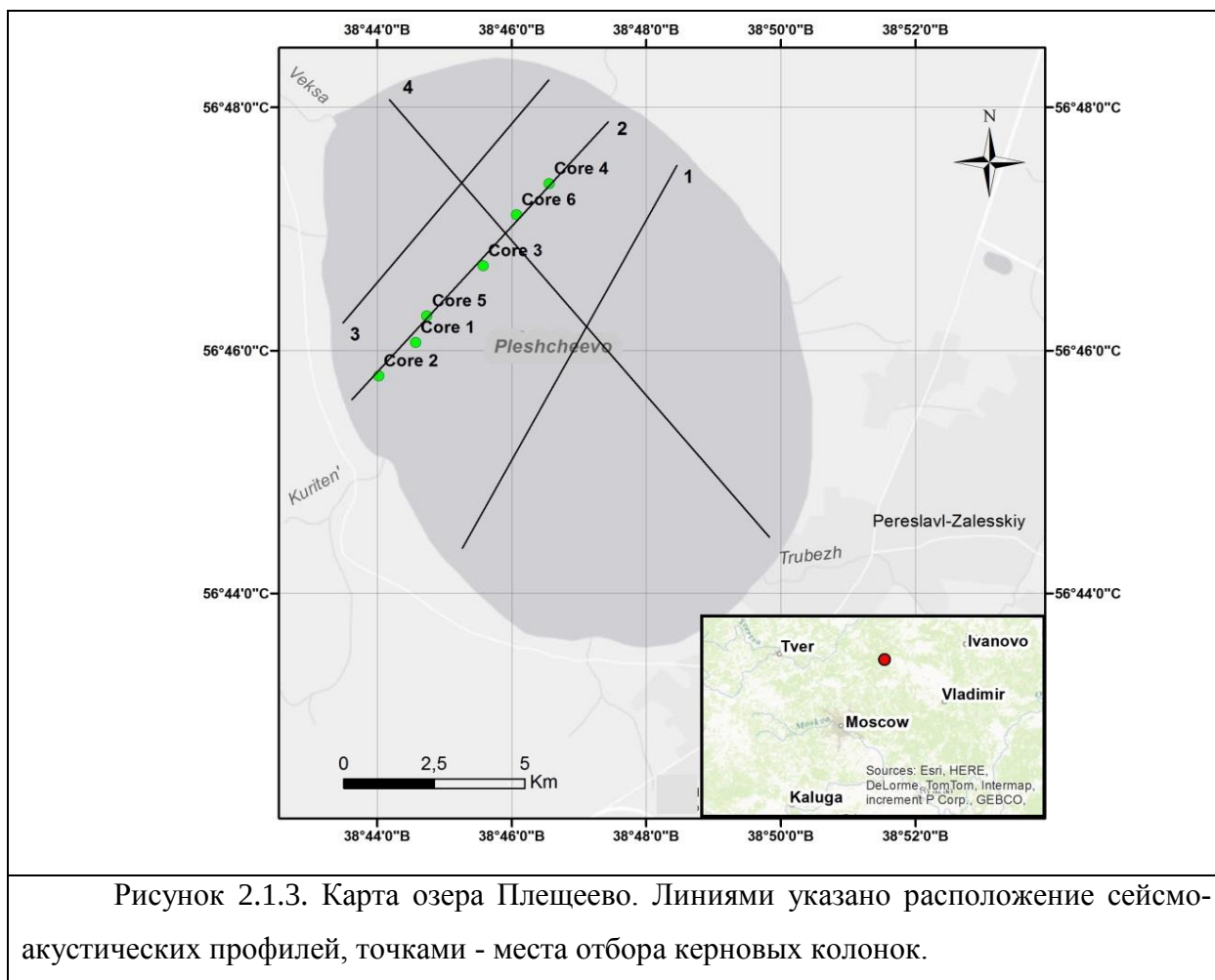


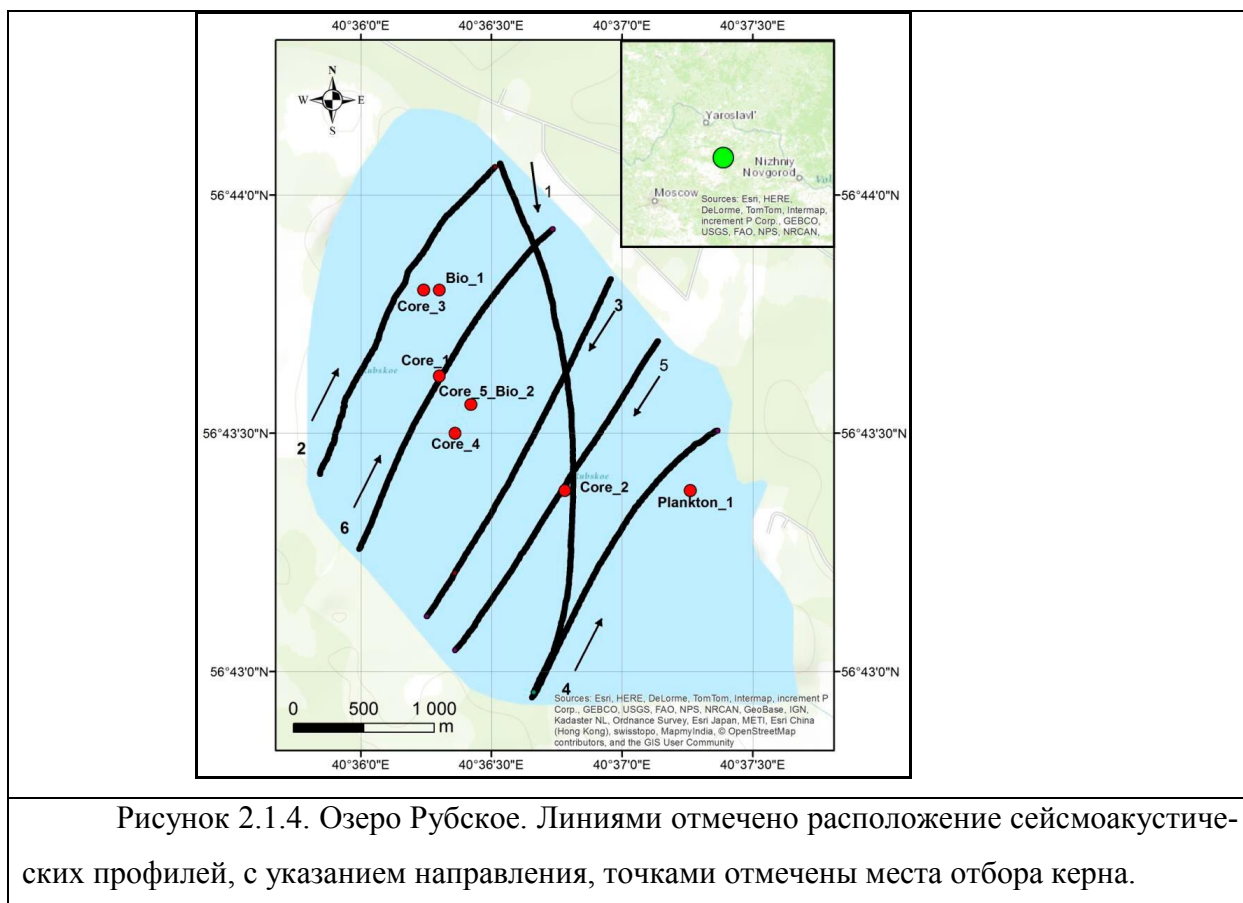
Рисунок 2.1.2. Карта озера Кандрыкуль.

Озеро Кандрыкуль. Озеро Кандрыкуль расположено в Западном Предуралье (рис. 2.1.2.) на Бугульминско-Белебеевской возвышенности в зоне лесостепи и частично в зоне широколиственных лесов. Площадь зеркала озера составляет 18 км. Максимальные глубины оз. Кандрыкуль составляет 16м. Отобраны 4 керновые колонки мощностью до 6 м.

Озеро Плещеево. Озеро Плещеево (рис. 2.1.3.) расположено на юго-западе Ярославской области на высоте 137 м над уровнем моря. Имеет округлую форму, берега ровные, низменные, заболоченные. Площадь озера составляет около 51 км², наибольшая длина - 9,5 км, максимальная ширина — 6,5 км. Глубина воды достигает 25 м. В озеро впадает река Трубеж, вытекает река Векса. Отобрано 6 керновых колонок донных отложений мощностью от 2.7 до 6.3 м. Палеомагнитные исследования проведены по 5 кернам. Расположение сейсмических профилей и точек отбора керна отображено на рис. 2.1.3.



Озеро Рубское. Озеро Рубское расположено в 42 км юго-западнее г. Иваново, в 15 км южнее г. Тейково, в 3 км западнее п. Синяя Осока. Площадь озера 303 га. Максимальная длина 2980 м., ширина - 1550 м., глубина - 17 м., периметр водного зеркала 7250 м (рис. 2.1.4.). В литературных источниках озеро характеризуется как мезотрофное, ледникового происхождения. Донные отложения представляют собой сапропель, максимальная мощность которых достигает 5 м. Сапропель темно-коричневый, мягкий, в верхнем полуметровом слое жидкий с большим количеством органического материала, ниже более плотный, пластичный, однородный. Отобрано 5 керновых колонок донных отложений мощностью от 3 до 5 м. Палеомагнитные исследования проведены по 4 кернам. Расположение сейсмических профилей и точек отбора керна отображено на рис.4.



Определение возраста донных отложений.

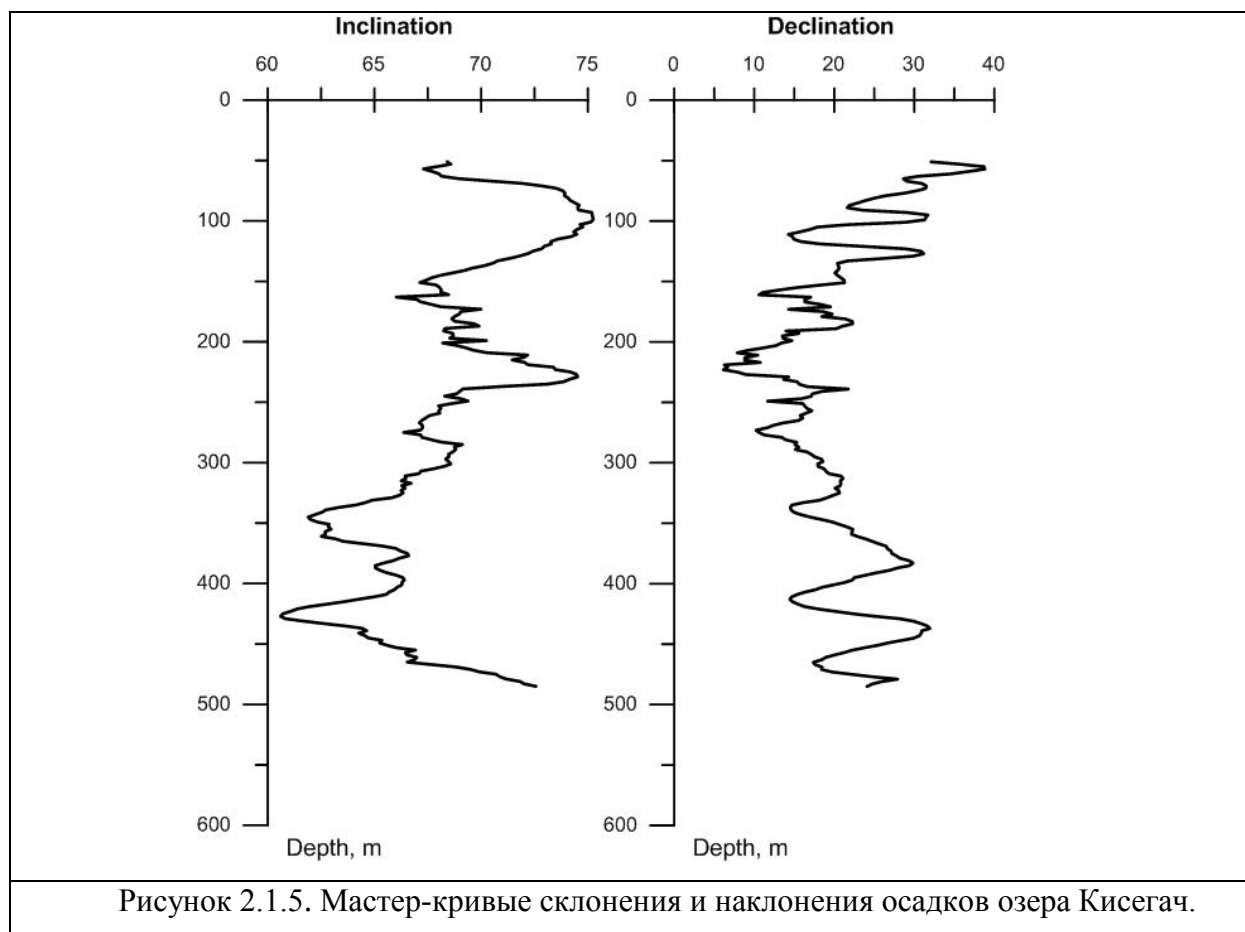
Радиоуглеродное датирование осадков проведено в ЕТН (Цюрих, Швейцария) с использованием масс-спектрометра акселерационного типа. Возраст был определен с использованием калибровочной кривой в программе OxCal [Bronk Ramsey, 1995]. При этом были выбраны временные интервалы с наибольшей вероятностью. Для определения возраста отложений озера Плещеево было проведено радиоуглеродное датирование 4 образцов, озера Рубское – 5 образцов. Согласно исследованиям на протяжении голоцена средняя скорость осадконакопления в озере Плещеево составляет 0,37 м/1000лет, а в оз. Рубское 0,38 м/1000лет.

Результаты исследований.

Озеро Кисегач.

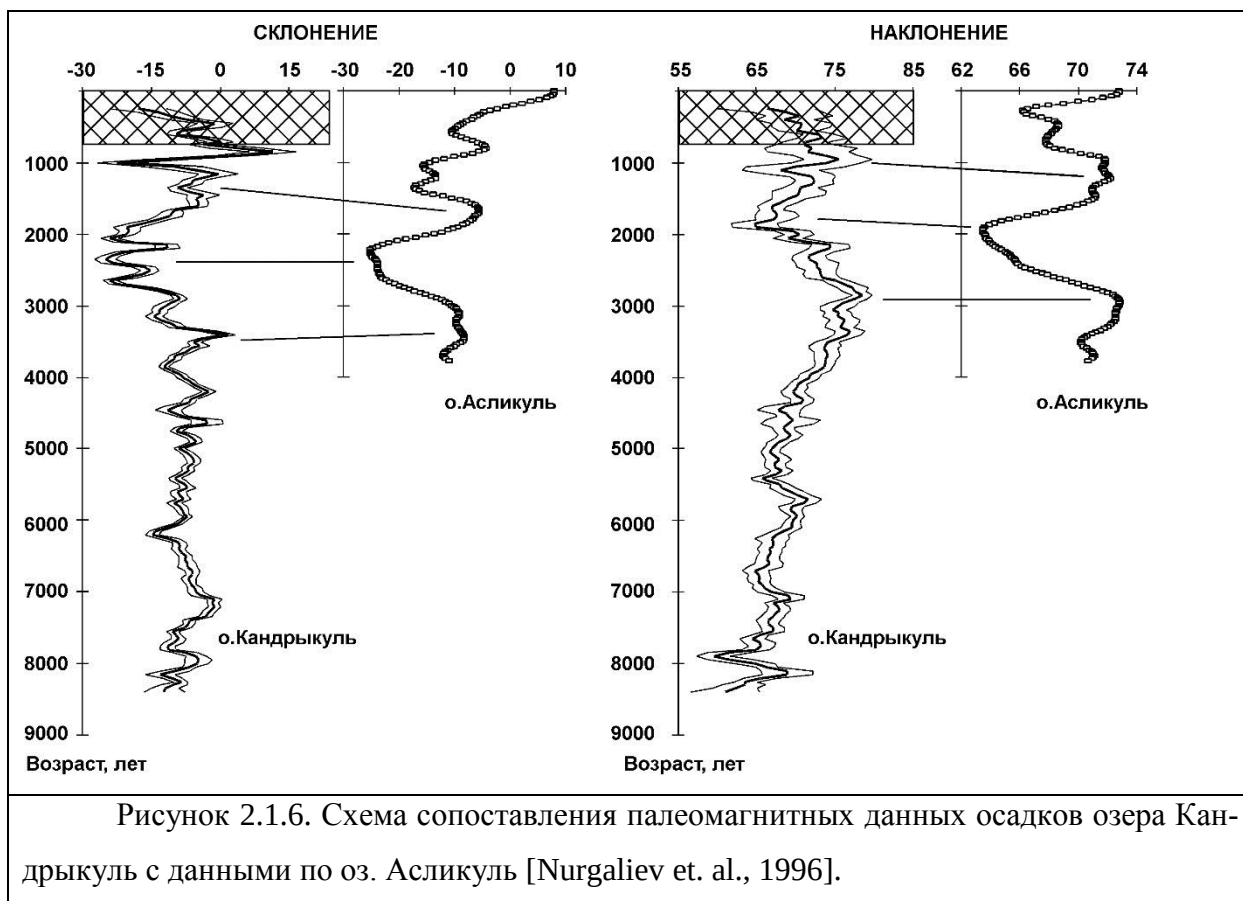
По данным магнитной восприимчивости и NRM проведена детальная корреляция разрезов керновых колонок. Полученные мастер-кривые склонения и наклонения представлены на рис. 2.1.5. Определение возраста озерных осадков на данном этапе

исследований не проводилось. Отобраны и подготовлены образцы для радиоуглеродного датирования.



Озеро Кандрыкуль.

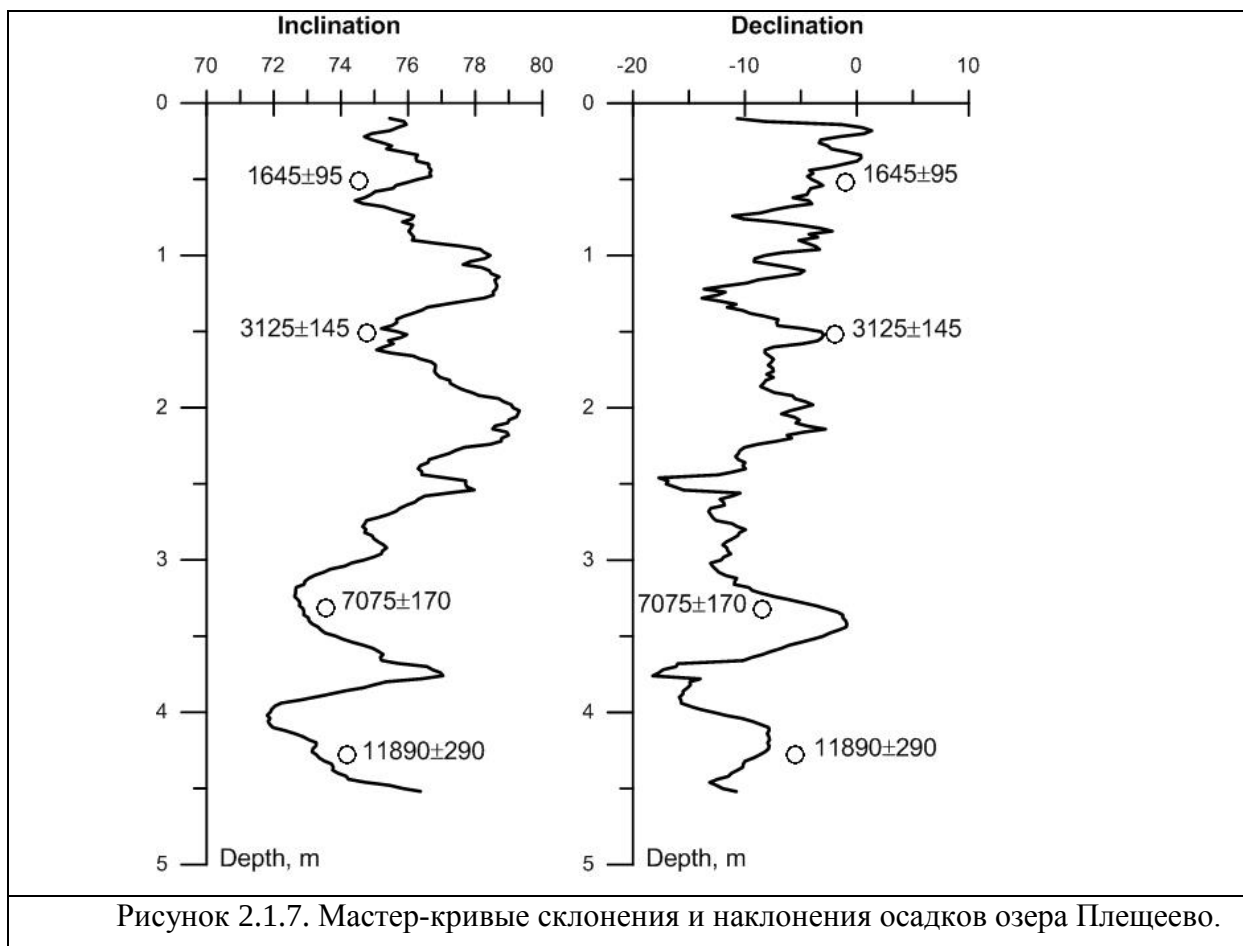
Также по данным магнитной восприимчивости и NRM проведена детальная корреляция разрезов керновых колонок. На рис. 2.1.6. представлено сопоставление мастер-кривых склонения и наклонения для озер Кандрыкуль и Асликуль [Nurgaliev et. al., 1996], расположенных на расстоянии 15 км.



Озеро Плещеево.

На данном этапе проекта результатом исследований являются построенные мастер-кривые склонения и наклонения (рис. 2.1.7.).

Для определения возрастной привязки осадков до 2500 лет использовались археомагнитные данные по Великобритании, Болгарии, Франции, Венгрии и Украине. Сравнение склонения и наклонения археомагнитных и лимномагнитных данных по озеру Плещеево представлено на рис. 2.1.8. Проведено сопоставление мастер-кривых по озеру Плещеево с мировыми лимномагнитными данными (рис. 2.1.9., 2.1.10.). Все определенные по мировым лимномагнитным данным экстремальные периоды четко определяются на мастер-кривых оз. Плещеево.



Озеро Рубское.

Данные магнитной восприимчивости и NRM послужили основой для проведения детальной корреляции разрезов керновых колонок оз. Рубское. На основе анализа вариаций склонения и наклонения, а также результатов магнито-минералогических исследований можно сделать вывод о том, что вектор естественной остаточной намагниченности осадков фиксируется только в нижней части керновой колонки, что связано с низким содержанием ферромагнетика и высоким содержанием органической компоненты.

Мастер-кривые склонения и наклонения представлены на рис. 2.1.11. Сопоставление мастер-кривых по озеру Рубское с мировыми лимномагнитными данными свидетельствует о потере палеомагнитного сигнала в верхней части разреза (Рис. 2.1.12., 2.1.13.). В нижней части разреза наблюдается хорошая корреляция полученных данных по оз. Рубскому с мировыми данными.

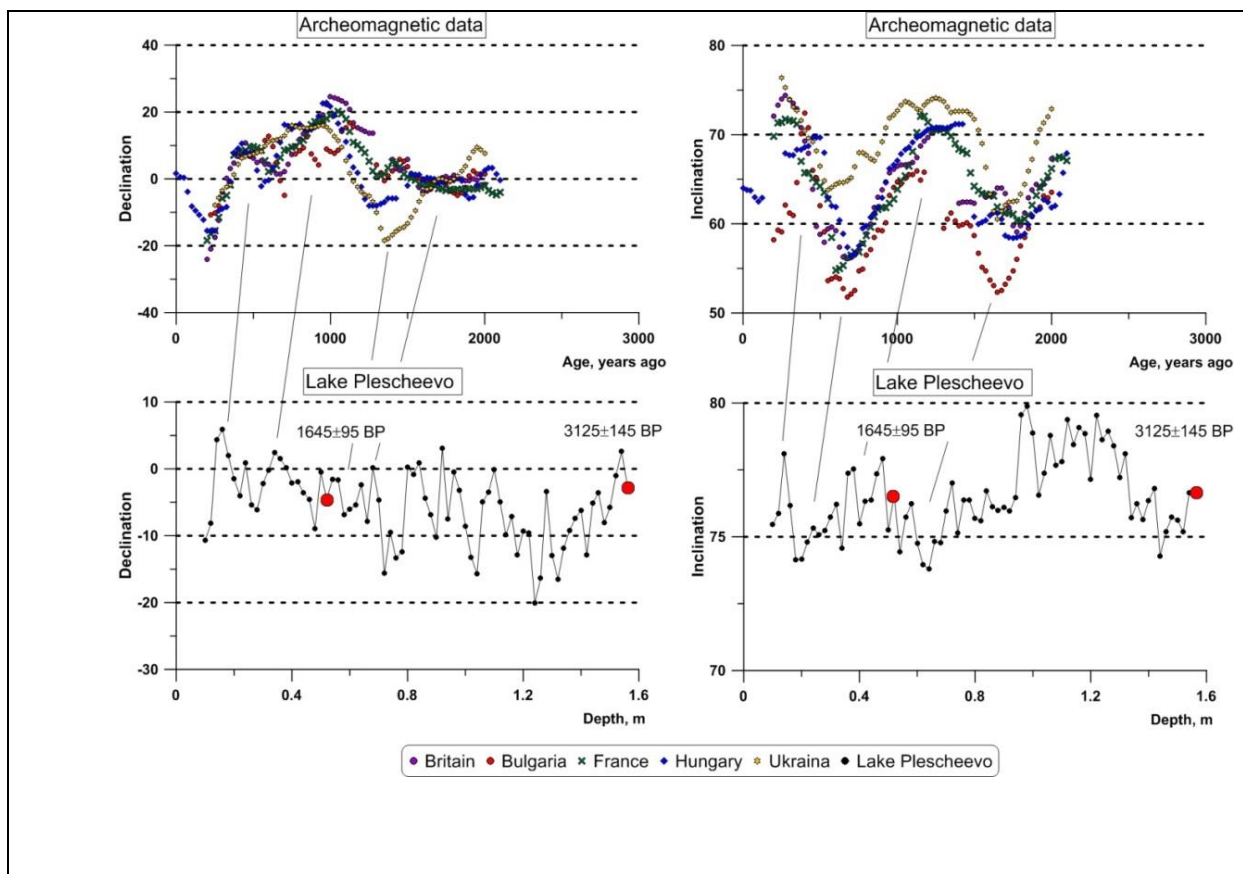


Рисунок 2.1.8. Схема сопоставления археомангнитных данных по Болгарии, Венгрии, Украине [Daly, Le Goff, 1996] с лимномагнитными данными по осадкам озера Плесеево.

Данные по осадкам озер Плесеево Рубское были сопоставлены с археомангнитными [Daly, Le Goff, 1996], с данными по Британским озерам [Turner and Thompson, 1981], с данными по озеру Наутайарви [Ojala and Saarinen, 2002], с данными по Белорусским озерам [Nourgaliev et. all., 2005].

Построение региональных мастер-кривых для Центральной России.

По результатам исследований вариаций магнитного поля по озерам Рубское и Плесеево, построены региональные мастер-кривые (рис. 2.1.14.) Визуально на кривой изменения наклона обнаруживается ряд особенностей, которые могут быть использованы для корреляции с другими записями вариаций геомагнитного поля в данном временном интервале.

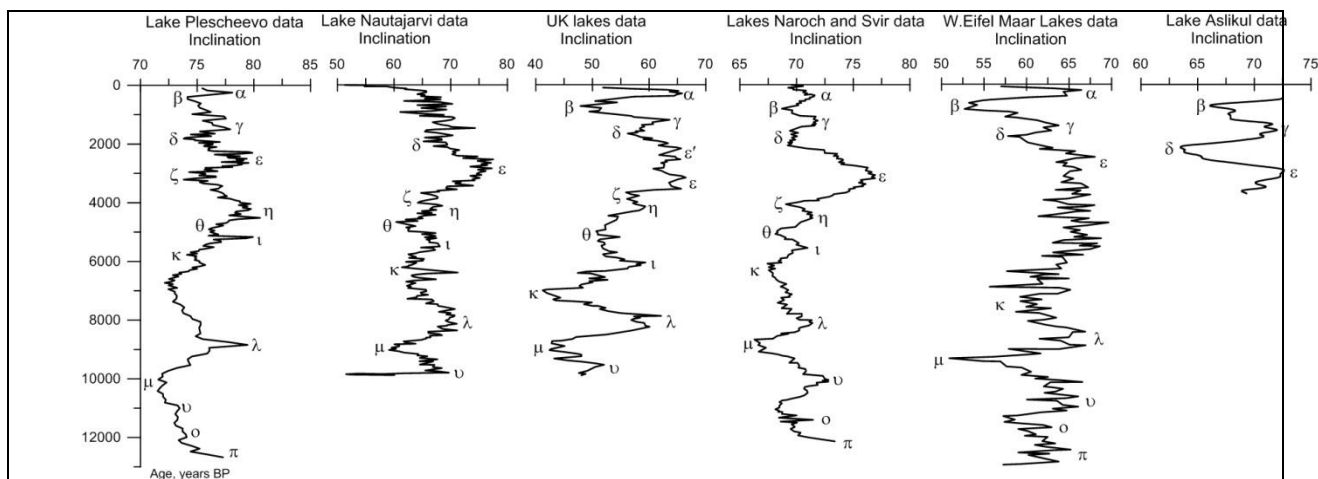


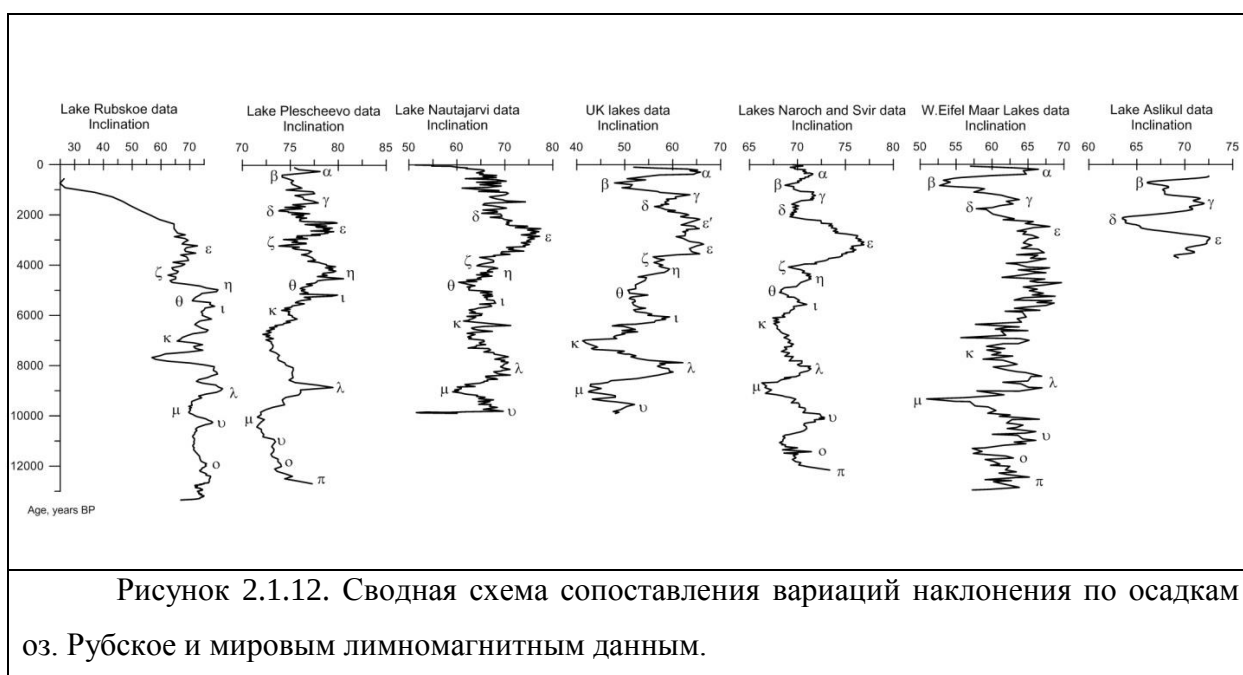
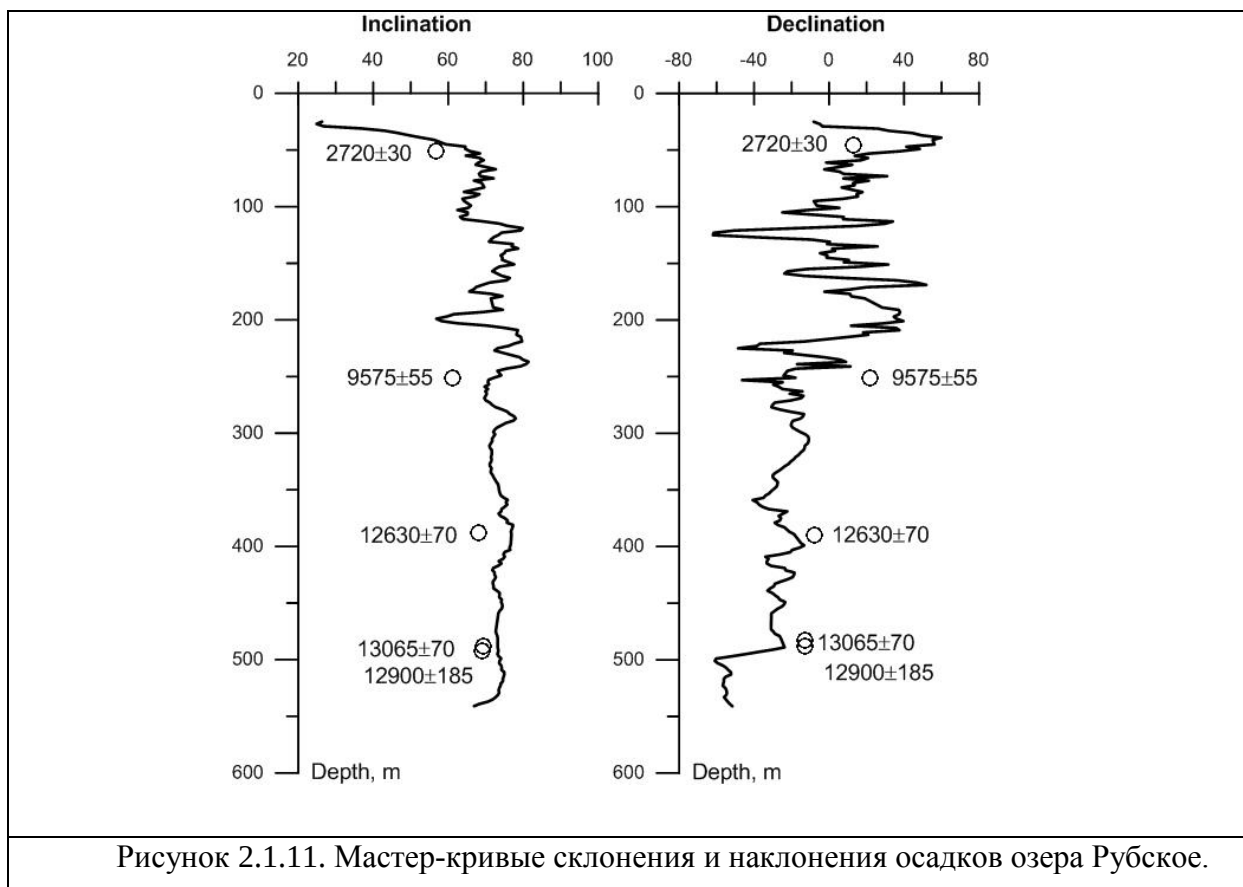
Рисунок 2.1.9. Сводная схема сопоставления вариаций наклонения по осадкам оз. Плещеево и мировым лимномагнитным данным.

Выделяется 6 максимумов наклонения: ϵ - максимум в интервале от 2400 до 2600 лет т.н. с экстремальным значением в области ~ 2450 лет т.н., η - максимум с экстремальным значением в области ~ 3500 лет т.н., ι - максимум в интервале от 4000 до 4500 лет т.н. причем данный интервал осложняется наличием локального минимума, λ - широкий максимум в интервале от 8750 до 9300 лет т.н. с экстремальным значением в области ~ 8950 лет т.н., ν - максимум с экстремальным значением в области ~ 11000 лет т.н., $\omicron$ - максимум с экстремальным значением в области ~ 12000 лет т.н. Минимумы величин наклонения выявляются в следующих временных интервалах: ζ широкий минимум в интервале от 2850 до 3350 лет т.н., θ минимум с экстремальным значением в области ~ 3900 лет т.н., κ минимум с экстремальным значением в области ~ 5800 лет т.н., μ широкий минимум в интервале от 9750 до 10700 лет т.н.

На кривой изменения склонения обнаруживается ряд особенностей, которые, также как и в наклонении, могут быть использованы для корреляции с другими записями вариаций геомагнитного поля в данном временном интервале.



Здесь выделяется пять максимумов (восточного) склонения: **e** - максимум в интервале от 1800 до 2350 лет т.н., **g** - максимум в интервале от 2950 до 3150 лет т.н., **g'** - максимум в интервале от 3450 до 3750 лет т.н. с экстремальным значением в области ~ 3600 лет т.н., **i** - максимум в интервале от 7900 до 8300 лет т.н. с экстремальным значением в области ~ 8200 лет т.н., **k** - широкий максимум в интервале от 9350 до 10350 лет т.н. с экстремальным значением в области ~ 9750 лет т.н., **l** - максимум с экстремальным значением в области ~ 10750 лет т.н. Минимальные (западные) величины склонения выявляются в следующих временных интервалах: **f** - минимум с экстремальным значением в области ~ 2500 лет т.н., **h** - самый значимый минимум на кривой расположен в интервале от 5350 до 5500 лет т.н. с экстремальным значением в области ~ 5000 лет т.н., **j** - широкий минимум в интервале от 8600 до 9250 лет т.н. с экстремальным значением в области ~ 8900 лет т.н.



Реконструкция характера климатических изменений в европейской части России в голоцена по осадкам оз. Плещеево.

Основным фактором, определяющим характер осадконакопления в озерах, являются климатические условия, которые определяют гидрологический и гидрохимический режим водоемов, преобладающий характер осадконакопления и тип отложений.

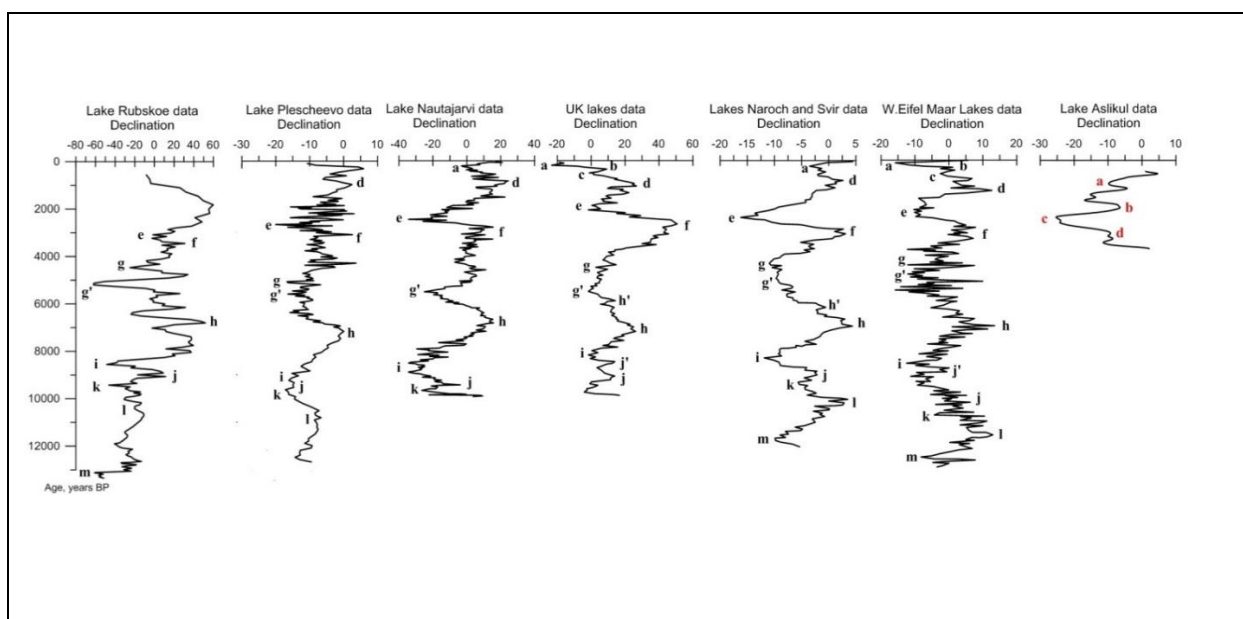
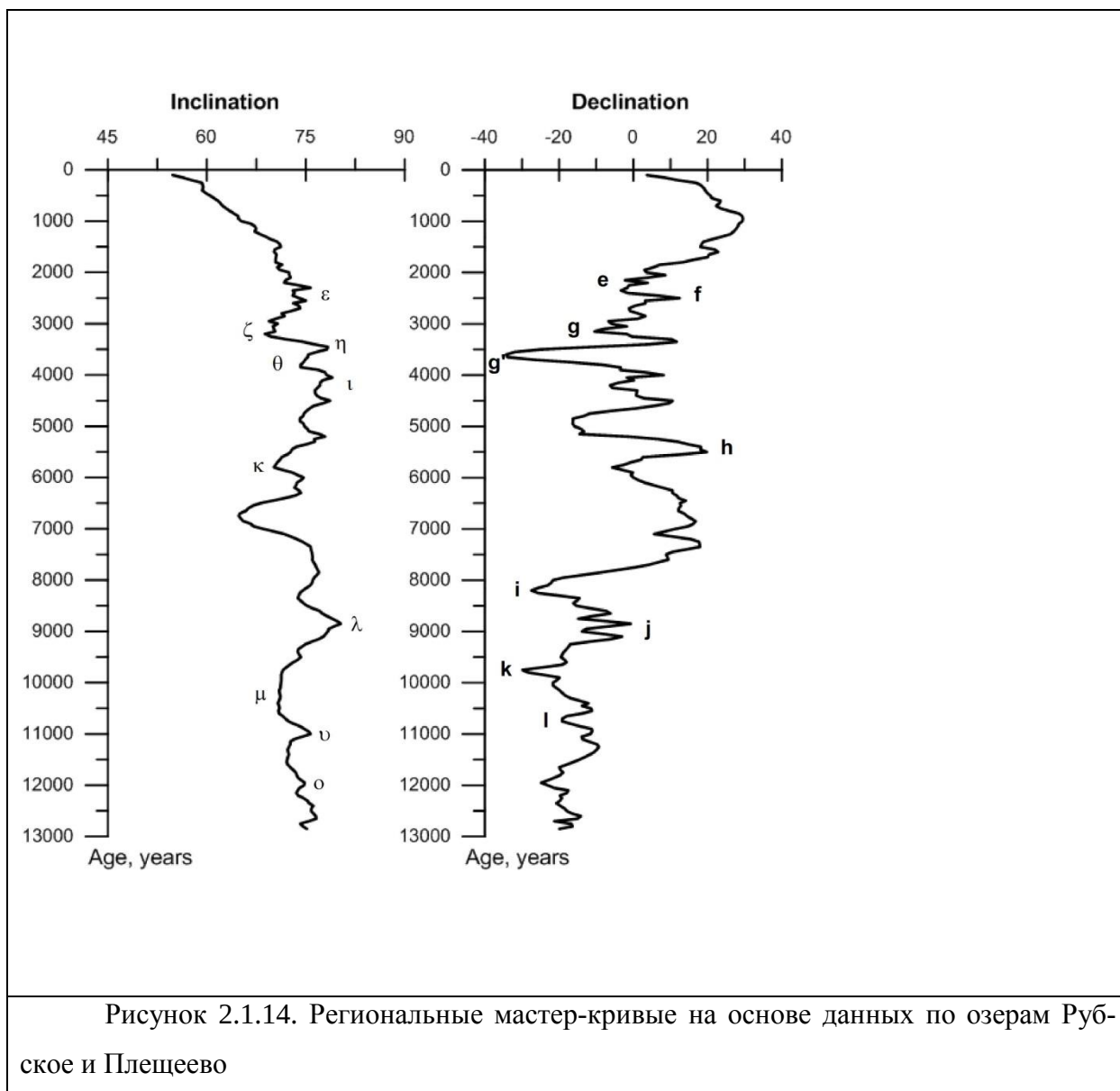


Рисунок 2.1.13. Сводная схема сопоставления вариаций склонения по осадкам оз. Рубское и мировым лимномагнитным данным.

Разнообразие типов озер и многочисленные факторы, определяющие процессы осадконакопления в каждом из них, формируют индивидуальный качественный и количественный состав отложений конкретного озера, который в последующем дает возможность для проведения палеореконструкций климата. [Wetzel, 2001]. Для палеореконструкций окружающей среды обычно используют палеобиологические данные, отражающие видовые и численные изменения флоры и фауны не только бассейна осадконакопления, но и прилегающей территории. В рамках исследования лимномагнитных параметров мы ведем поиск связей магнитных параметров осадков с изменениями окружающей среды и климата. Кроме того, некоторые обобщенные данные – такие как скорость осадконакопления дают интересную информацию о климатических и тектонических процессах. Например, полученные нами данные о скоростях осадконакопления в исследованных озерах свидетельствуют о минимум четырех этапах изменения условий климатической системы в первой половине голоценового периода (в течение последних 5 тыс. лет). Эти выводы подтверждают детальные палеобиологические исследования донных отложений оз. Плесеево.



Проведенный палинологический анализ позволяет предложить схему палинологической зональности. Схема включает 4 основные палинозоны и ряд подзон и позволяет сделать следующие выводы о времени и условиях осадконакопления:

Зона I может быть разделена на 3 пыльцевые подзоны.

Подзона Ia является самой тёплой за исследуемый интервал. Возможный возраст 6000-7000 лет. Атлантическое время голоцена.

Подзона Ib характеризуется более влажным климатом и свидетельствует об усилении эвтрофикации озера.

Подзона Ic характеризуется более холодным климатом по сравнению с предыдущим интервалом. Возможно, это отражает начало суббореального похолодания около 5000 л.н.

Зона II отражает дальнейшее ухудшение климата в начале Субатлантического периода около 2500 л.н. и усиление эвтрофикации озера. Характеризует начавшуюся сельскохозяйственную активность человека.

Зона III характеризуется высокой эвтрофикацией озера, сельскохозяйственной активностью человека (вырубкой ценных пород деревьев).

Зона IV свидетельствует о мелководности озера и произрастании на его берегах сосновых лесов.

В дальнейшем мы рассмотрим связь этих климатических циклов с вариациями лимномагнитных параметров: как с точки зрения привноса терригенного материала в озеро (вариации парамагнетизма осадков за счет изменения содержания глинистой компоненты), так и изменения биопродуктивности озера (вариации содержания остатков магнитотактических бактерий).

Выводы

По результатам исследований вариаций магнитного поля по озерам Рубское и Плещеево, построены региональные мастер-кривые для центральной европейской части России. Обнаружена хорошая корреляция кривых изменения склонения и наклонения за последние 13000 лет по лимномагнитным данным изученных озер с западноевропейскими археомагнитными и лимномагнитными данными. Тем не менее, на кривых вариаций наклонения и склонения обнаруживается ряд особенностей, которые могут быть использованы для корреляции с другими записями вариаций геомагнитного поля в голоцене. В особенности в интервалах 0-500 AD и 1000-2000AD отмечается резкая изменчивость вариаций склонения и наклонения древнего магнитного поля в европейской части России и ухудшение корреляции с западноевропейскими археомагнитными и лимномагнитными данными. Это может быть обусловлено усилением влияния крупного недипольного источника на фоне уменьшения общей интенсивности геомагнитного поля. Целый ряд мелких аномалий может быть не замечен по археомагнитным данным ввиду их дискретности и это надо учитывать и повысить детальность исследований в этих временных интервалах.

Средняя скорость осадконакопления изученных озер составляет 0.375м/1000 лет, причем разброс в течении почти всего голоцена имеет близкие тренды. Это свидетельствует о том, что характер осадконакопления здесь в основном контролируется климатическими изменениями, а тектонический фактор практически не меняется и его влиянием можно пренебречь. Этот факт мы используем для предварительной оценки возраста озерных отложений по мощности и характеру сейсмоакустического разреза. Абсолютные датировки разрезов, палинологические данные, корреляции разрезов на основе лимномаг-

нитных и археомагнитных данных свидетельствуют о минимум четырех этапах изменения условий климатической системы в течение последних 5-6 тыс. лет в европейской части России.

2.2. Построение опорной кривой вековых вариаций геомагнитного поля на Камчатке в голоцене

Актуальность. Вековые вариации геомагнитного поля представляют собой перспективный инструмент для исследования магнитного поля Земли. Исследования вариаций важны для построения моделей магнитного геодинамо и понимания процессов, протекающих в жидком внешнем ядре Земли. Кроме того, эти данные могут быть использованы и для чисто геологических целей, например, для корреляции пространственно удаленных районов вулканических провинций и для оценки длительности магматических событий.

На настоящий момент для геомагнитного поля позднего голоцена разработан ряд глобальных математических моделей, основанных на компиляции данных по лавовым потокам, озерным осадкам и археологическим объектам [Korte et al., 2011; Donadini et al., 2009; Nilsson et al., 2014]. Надежность таких моделей остается недостаточной из-за неравномерного распределения результатов исследования вариаций по поверхности Земли. В частности, по северо-востоку Азии надежная информация о вековых вариациях остается скудной, а данные по некоторым регионам до сих пор отсутствуют. В связи с этим получение новых данных по угловым элементам геомагнитного поля позднего голоцена Камчатки представляет интерес не только для региональных сопоставлений, но и для глобальных моделей, в том числе для определения недипольных компонент геомагнитного поля.

Цели и задачи. Основной целью работы являлось получение новых надежных определений направления геомагнитного поля по голоценовым вулканическим породам Камчатки. Для этого были решены следующие задачи:

1. Проведение магнитной чистки палеомагнитных коллекций лавовых потоков и маркирующих горизонтов тефры Северной группы вулканов Камчатки;
2. Расчет средних палеомагнитных направлений по потокам и тефровым прослоям, отвечающим различным стратиграфическим уровням.
3. Сопоставление полученных данных с результатами палеомагнитных исследований почвенно-пирокластического чехла, опубликованных в [Кочегура и др., 1986].
4. Сравнение полученной кривой вековых вариаций с предсказаниями модели геомагнитного поля pfm9k.1a [Nilsson et al., 2014].

Объекты исследования. В качестве объектов были выбраны базальтовые лавовые потоки вулканов Ключевской и Толбачик, а также маркирующие горизонты тефры андезитового состава вулкана Шивелуч в разрезах р. Кабеку (юго-восточное подножие вулкана Шивелуч) (рис. 2.2.1.). Выбор объектов был обусловлен наилучшей обнаженностью и наличием максимально детальной тефрохронологической информации о возрасте потоков. Всего были получены результаты по 12 лавовым потокам вулкана Ключевской и по 2 потокам вулкана Толбачик. Возраст лав определялся по соотношению с маркирующими горизонтами тефры в подстилающих и перекрывающих почвенно-пирокластических чехлах согласно методике, разработанной О.А. Брайцевой с коллегами [Брайцева и др., 1978] (рис. 2.2.2.). Также удалось рассчитать средние палеомагнитные направления по маркирующим горизонтам тефр SH_5 и $SH_{\#5}$ разрезов р. Кабеку (юго-восточное подножие вулкана Шивелуч).

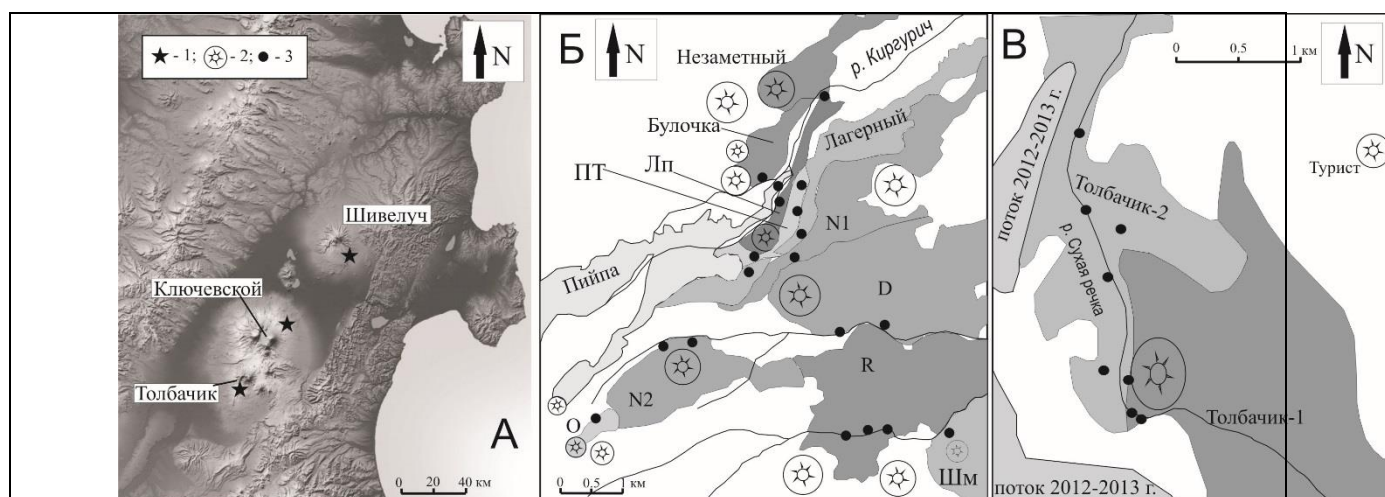
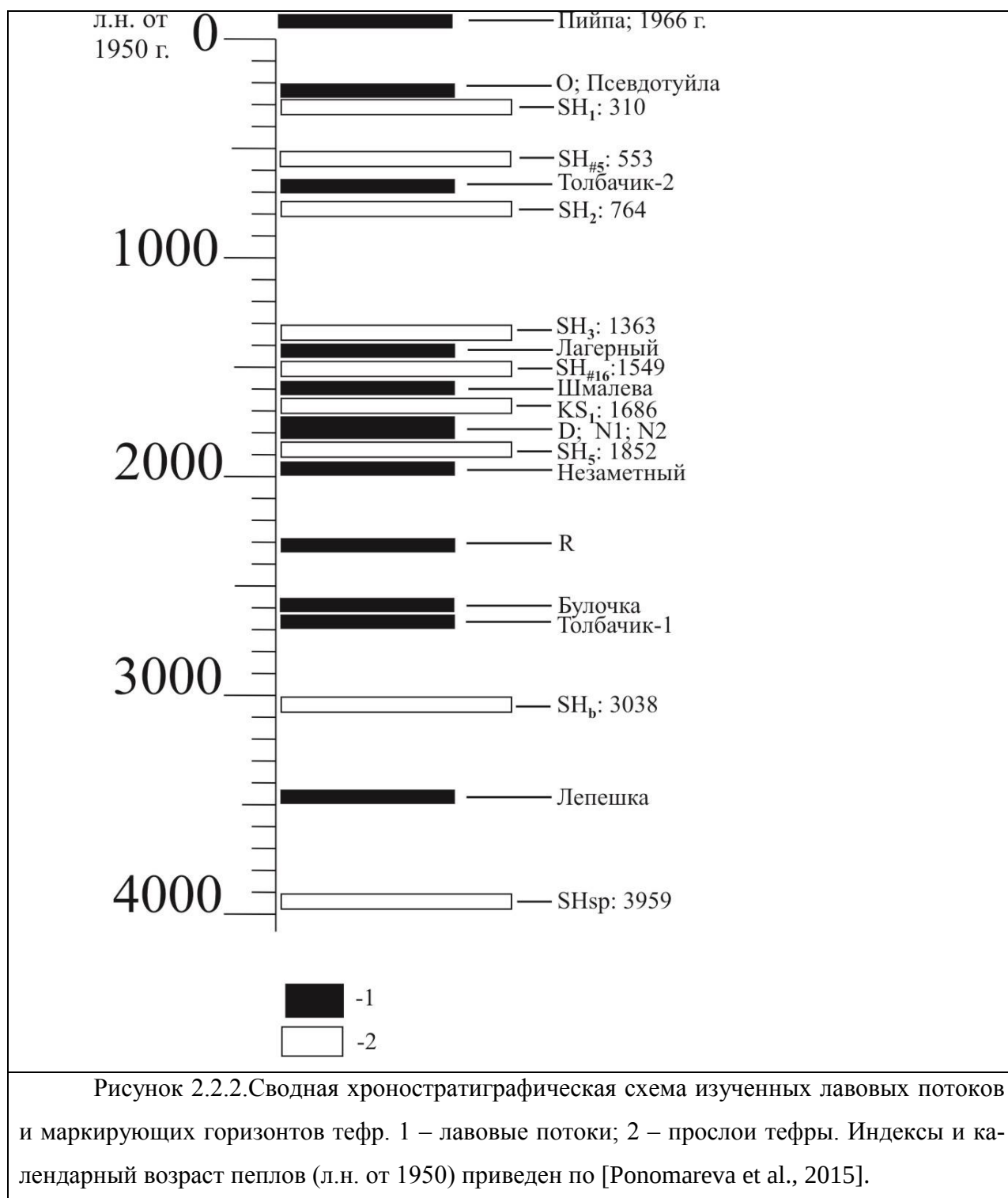


Рисунок 2.2.1. Схема расположения объектов исследования.

А. Северная группа вулканов Камчатки. 1 – расположение районов исследования; 2 – шлаковые конусы; 3 – палеомагнитные сайты.

Б. Схема изученных лавовых потоков на северо-восточном склоне вулкана Ключевской по О.А. Брайцевой, И.В. Мелекесцеву, В.В. Пономаревой (неопубликованные данные). Сокращения: ПТ – Псевдотуйла; ШМ – Шмалева; Лп – Лепешка.

В. Схема изученных лавовых потоков на южном склоне вулкана Толбачик, по [Churikova et al., 2015]



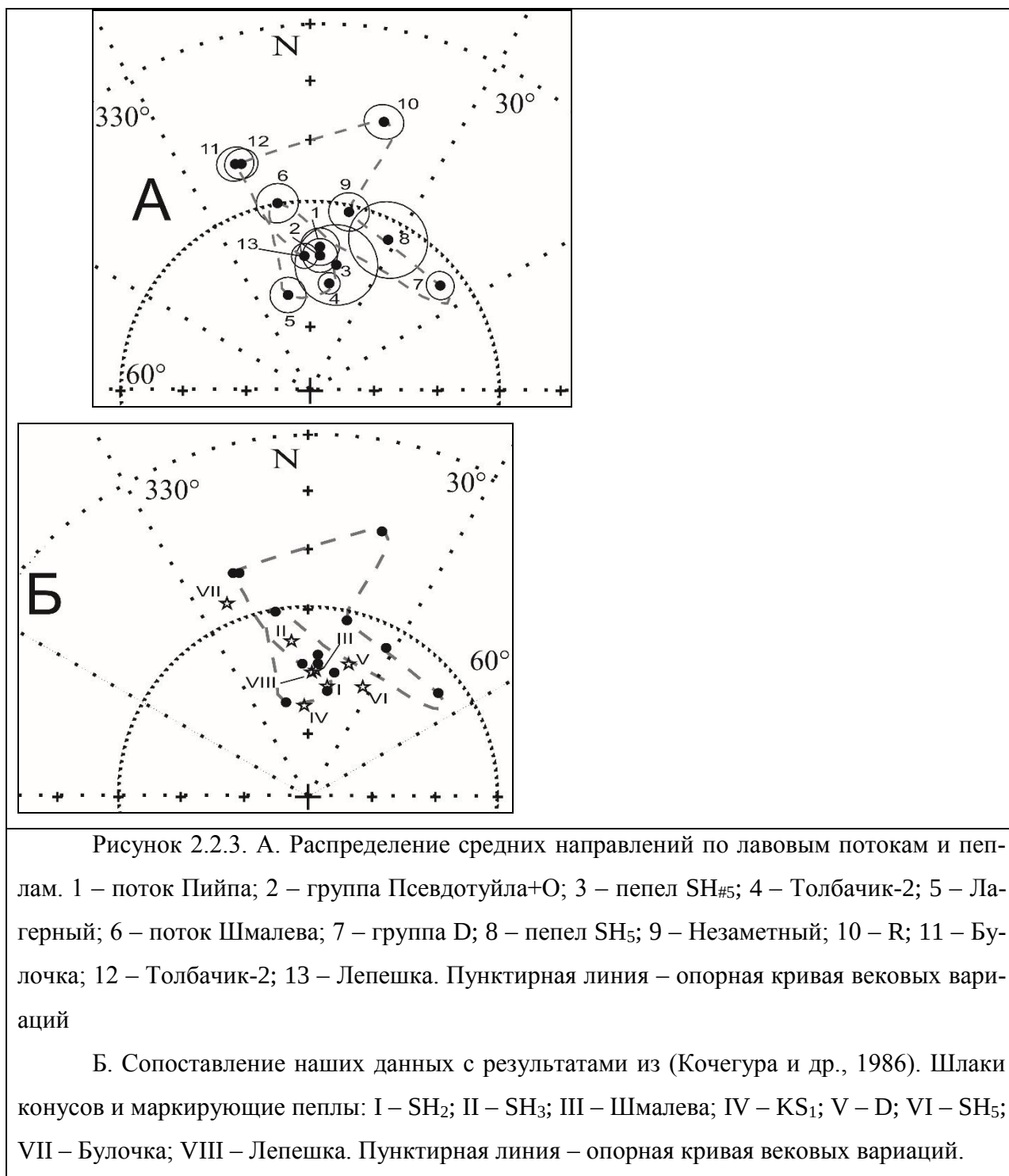
Методика. Образцы лавовых потоков и пепловых горизонтов были подвергнуты ступенчатой температурной чистке (около 40% всех образцов) и чистке переменным магнитным полем (около 60%). Детальность чистки в большинстве случаев составляла 7-15 шагов. Для терморазмагничивания образцов использовали немагнитные печи “ММТД-80” с величиной нескомпенсированного поля не более 5–10 нТл. Ступенчатая чистка переменным магнитным полем осуществлялась до 130 мТл с помощью приставки к криоген-

ному магнитометру 2G Enterprises. Остаточная намагниченность образцов измерялась при помощи спин-магнитометров “JR-6” AGICO и криогенного магнитометра “Khramov” 2G Enterprises. Обработку измерений остаточной намагниченности выполняли при помощи пакета программ Enkin и Remasoft, использующих при выделении компонент намагниченности метод PCA [Kirschvink, 1980]. Анализ полученных данных производился с использованием статистики Фишера [Fisher, 1953].

Результаты. Для каждого из опробованных лавовых потоков удалось рассчитать среднее направление геомагнитного поля. При расчете среднего значения использовались только направления, полученные по образцам с хорошей палеомагнитной записью. Для лавовых потоков, опробованных в нескольких сайтах, расчет среднего осуществлялся на уровне образцов. В ряде случаев для потоков, отнесенных на основании тефрохронологических данных к единым стратиграфическим уровням, были получены средние направления, статистически неразличимые методом теста обращения [McFadden, McElhinny, 1990]: потоки О и Псевдотуйла; D, N2, N1. Поскольку эти факты указывают на синхронность (в геологическом смысле) излияния потоков, в таких случаях рассчитывалось среднее направление по всем потокам на уровне образцов. В итоге были рассчитаны направления для 12 лавовых потоков или групп потоков вулканов Ключевской и Толбачик, при этом величина доверительного интервала α_{95} для всех определений не превышает 3.5° .

Также были рассчитаны средние направления геомагнитного поля по маркирующим горизонтам SH_{#5} и SH₅. Поскольку возраст этих прослоев известен [Ponomareva et al., 2015], точное определение палеонаправлений по ним чрезвычайно важно для построения опорной кривой вековых вариаций. К сожалению, точность определения средних направлений для пепловых прослоев оказалась существенно ниже, чем для лавовых потоков ($\alpha_{95}=6.1^\circ$ для SH₅ и 6.4° для SH_{#5}).

В результате проведенных исследований нами были получены 13 независимых направлений геомагнитного поля для голоценовых вулканитов Камчатки. Распределение средних направлений с доверительными интервалами показано на рис. 2.2.3.А. Для большей части лавовых потоков круги доверия не перекрываются между собой, то есть запись вековых вариаций в этих объектах достаточно контрастна. Этот результат является благоприятным как для построения опорной кривой, так и для региональных геологических корреляций. Полученные направления геомагнитного поля могут быть использованы как основа для опорной кривой вековых вариаций для позднего голоцена Камчатки (рис. 2.2.3.).



Для потоков Булочка, R, Незаметный, которые по тефрохронологическим данным попадают в единый стратиграфический диапазон, мы получили значительно различающиеся палеомагнитные направления (рис. 2.2.3. А). Это указывает на значительный временной промежуток, разделяющий излияния этих потоков. Следовательно, вековые вариации в данном случае можно использовать как дополнительный инструмент идентификации разновременных вулканических событий. Хотя имеющихся на данный момент палеомагнитных и тефрохронологических данных недостаточно для более точной возрастной привяз-

ки, на основании положения этих потоков в разрезах почвенно-пирокластического чехла можно восстановить последовательность их излияния (рис. 2.2.2.).

Рассчитанные палеомагнитные направления для потоков Булочка (вулкан Ключевской) и Толбачик-1 (вулкан Толбачик) практически идентичны друг другу (угловая разница $\gamma=0.9^\circ$) и значимо отличаются от всех остальных полученных направлений. Этот факт свидетельствует в пользу близкого по времени излияния этих потоков. Тефрохронологические данные не противоречат этой информации (оба лавовых потока перекрываются горизонтом SH₅ и подстилаются существенно более древними маркирующими прослоями), хотя и не предоставляют более точной возрастной привязки.

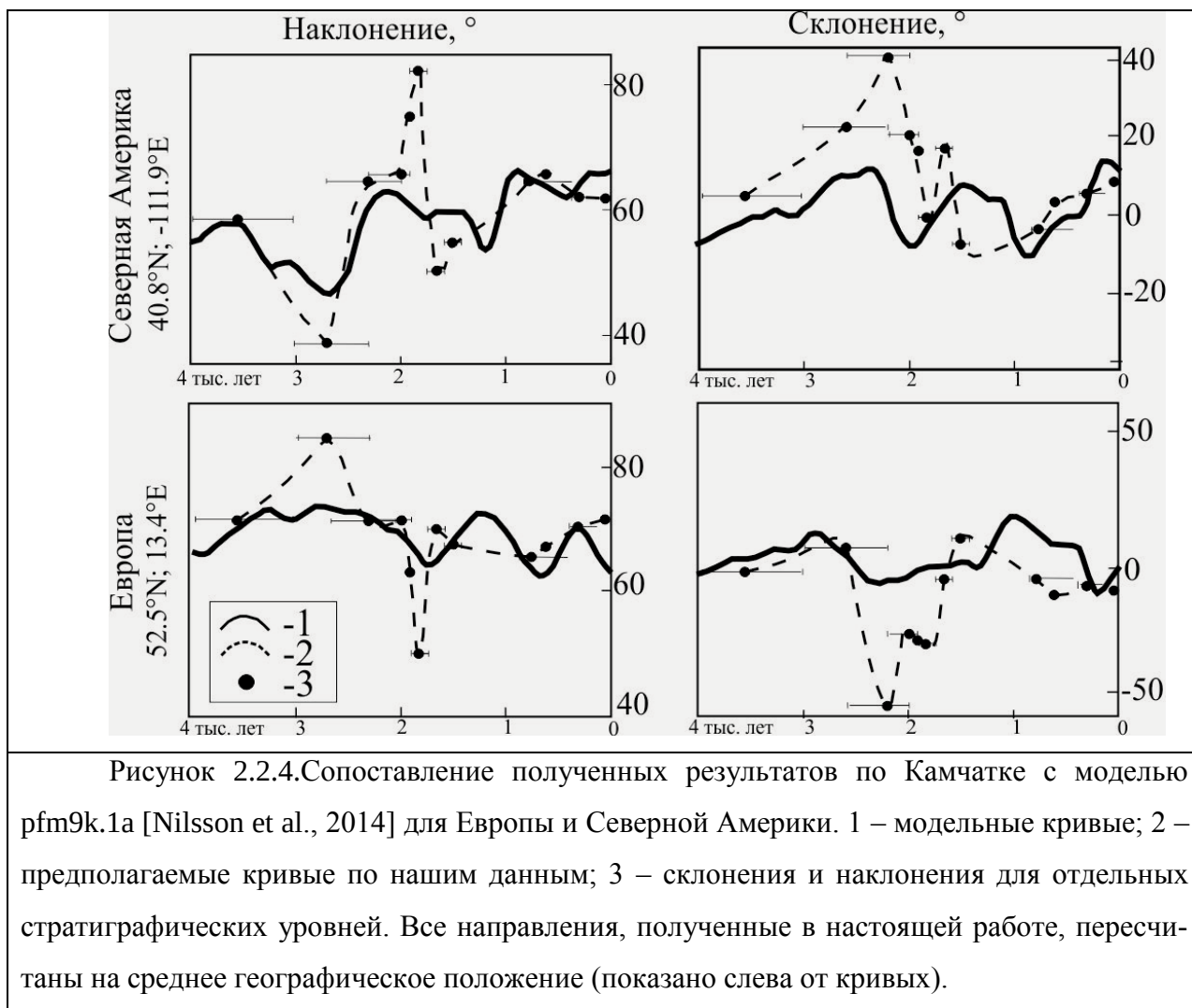
Было проведено сопоставление наших результатов с данными предшественников [Кочегура и др., 1986] по фрагментам разреза («палеомагнитные группы» по [Кочегура и др., 1986]), содержащим известные маркирующие горизонты SH₂, SH₃, KS₁, SH₅, а также прослой шлаков, ассоциированные с опробованными нами лавовыми потоками D, Шмалева, Булочка и Лепешка. На рис. 2.2.3. Б вынесены направления геомагнитного поля по этим слоям, опубликованные в работе [Кочегура и др., 1986] и наши данные.

В целом палеомагнитные направления пирокластических прослоев из [Кочегура и др., 1986] близки к основной массе направлений, полученных нами. Для лавовых потоков Булочка и Лепешка и соответствующих им шлаковых горизонтов направления статистически неразличимы. Для остальных объектов: потоков D и Шмалева и прослоя тефры SH₅ – направления значимо отличаются от приведенных в работе [Кочегура и др., 1986]. Сравнивая результаты по лавам и шлакам, в данном случае мы считаем более предпочтительным использовать для характеристики геомагнитного поля в момент извержения палеомагнитные направления, полученные по лавам, поскольку: 1) для них полностью проведена процедура магнитной чистки и компонентного анализа; 2) они рассчитаны по нескольким сайтам; 3) для палеонаправлений по прослоям шлаков в большинстве случаев (кроме шлаков конуса D) в работе [Кочегура и др., 1986] приведено среднее направление вместе с близкими по направлениям горизонтам почвенно-пирокластического чехла и, следовательно, они представляют результат осреднения геомагнитного поля за некоторый промежуток времени.

Мы сопоставили наши данные с последней из глобальных моделей геомагнитного поля pfm9k.1a [Nilsson et al., 2014], построенной на компиляции археомагнитных определений и результатов по вулканическим и осадочным породам. Модель pfm9k.1a была выбрана для сопоставления из трех, предложенных авторами [Nilsson et al., 2014], поскольку в ней наилучшим образом скорректированы неопределенности, связанные с определением возраста осадочных пород. Поскольку информации по северо-востоку Азии в современ-

ных моделях геомагнитного поля на данный момент недостаточно, было проведено сравнение с модельными кривыми для двух других регионов Северного полушария: Европы и Северной Америки. Для этого полученные нами палеомагнитные направления были пересчитаны на средние географические точки рассматриваемых локаций, использованные в работе [Nilsson et al., 2014] при составлении модели, расположенные, как и Камчатские объекты, в умеренных широтах.

На рис. 2.2.4. показаны модельные кривые изменения угловых элементов геомагнитного поля для Северной Америки и Европы за последние 4000 лет согласно модели *pfm9k.1a* [Nilsson et al., 2014] и направления, полученные в настоящей работе, пересчитанные для данных регионов. В возрастном диапазоне последней тысячи лет данные по Камчатке демонстрируют достаточно хорошее соответствие предсказаниям модели для обоих регионов. Единственное полученное нами определение возрастного интервала 3 – 4 тыс. лет назад также показывает близкие к ожидаемым значения угловых элементов геомагнитного поля. В то же время во временном промежутке 1.5 – 3 тыс. л.н. наши данные демонстрируют значительно больший разброс склонений и наклонений по сравнению с ожидаемыми согласно модели, с отдельными резкими отскоками. Таким образом, наши данные указывают на значительные расхождения в вариациях угловых элементов геомагнитного поля на Камчатке и в Североамериканском и Европейском регионах, по крайней мере, в интервале 1.5 – 3 тыс. л.н. Для детализации опорной кривой вариаций для Камчатки необходимо дополнить наши определения значительным количеством палеомагнитных данных, удовлетворяющих современным критериям надежности.



Выводы.

1. На современном аппаратурно-методическом уровне получены новые палеомагнитные определения по лавовым потокам и пирокластике Северной группы вулканов Камчатки, отвечающие 12 стратиграфическим уровням в течение последних 4000 тыс. лет. При этом величина доверительного интервала α_{95} для направлений по лавовым потокам не превышает 3.5° . Данные результаты представляют основу опорной кривой вековых вариаций для позднего голоцена Камчатки.

2. Показана перспективность исследований вековых вариаций для региональной корреляции вулканических событий. На основании различия палеомагнитных направлений удалось установить, что потоки Булочка, R, Незаметный (вулкан Ключевской), соответствующие единому стратиграфическому диапазону по тefрохронологическим данным, были сформированы в разное время. Напротив, статистически незначимые различия палеомагнитных направлений указывают на синхронность формирования лавовых пото-

ков О и Псевдотуйла; D, N1 и N2; Булочка и Толбачик-1 (последний – вулкан Толбачик, остальные – вулкан Ключевской).

3. Выявленные особенности вековых вариаций на Камчатке имеют ряд существенных отклонений от предсказаний модели pfm9k.1a (Nilsson et al., 2014) для других регионов Северного полушария. Это указывает на значительный вклад недипольных составляющих в геомагнитное поле рассматриваемого интервала времени, а также на необходимость получения значительного объема надежных палеомагнитных данных по Камчатке и по северо-восточной Азии в целом для разработки адекватной версии глобальной модели геомагнитного поля позднего голоцена.

2.3. Вариации геомагнитного поля на территории европейской части России в последнем тысячелетии.

Исследование напряженности древнего магнитного поля Земли имеет важное значение для тестирования существующих численных моделей геомагнитного поля, их корректировки и дальнейшего развития. Основной трудностью при их разработке является неравномерное пространственно-временное распределение данных, возникшее вследствие естественного распределения археомагнитных объектов либо отсутствия исследований в некоторых регионах. На территории Центральной части России изучение напряженности магнитного поля в течение исторического периода времени проводилось в 60 – 80 годах XX века, но в настоящее время большинство из полученных ранее определений палеонапряженности не отвечает современным требованиям, предъявляемым к такого рода определениям.

Основной целью настоящей работы являлось получение новых качественных данных о напряженности геомагнитного поля в течение второго тысячелетия нашей эры.

В 2016 году завершены основные измерения коллекций, отобранных за последние три года на археологических и архитектурных памятниках Великого Новгорода, Ярославской и Московской областей. Всего было отобрано более 300 фрагментов обожженных глиняных изделий, представляющих 30 разновозрастных групп из интервала времени с начала XI по первую треть XIX вв.

Каждая из групп, входящих в коллекцию, была датирована с точностью до одного года, датирование производилось на основе исторических свидетельств и типологии археологических артефактов. Разновозрастные группы представлены обожженными глиняными изделиями – кирпичами из архитектурных памятников, изразцами, керамикой из многослойных археологических памятников (рис. 2.3.1.).



Рисунок 2.3.1. Археологические и архитектурные памятники – объекты археоманнитного исследования (г. Великий Новгород). а – Церковь Петра и Павла на Сильнице; б – Деревяницкий монастырь; в – раскопки церкви Андрея Юродивого на Ситке, г – раскопки церкви Покрова Шилова монастыря.

На фрагментах археоманнитных коллекций В. Новгорода и Ярославской области были выполнены магнито-минералогические исследования для определения магнитных минералов – носителей естественной остаточной намагниченности и для проверки их термостабильности. Эти исследования выполнялись на аппаратной базе Лаборатории Археоманнетизма и эволюции геомагнитного поля ИФЗ РАН с использованием магнитных весов Кюри и вибромагнетометра конструкции Виноградова, каппа-мосте МФК1 с приставкой CS3 и JR-6 (производства Agico, Чехия).

Петромагнитные исследования в совокупности с экспериментами [Lowtie, 1990] показали наличие трех групп фрагментов различного магнито-минерального состава. К первой группе относятся фрагменты, в составе которых преимущественным магнитным минералом является (титано)магнетит. Вторая группа отличается от первой наличием, в дополнение к (титано)магнетиту, магнитожесткого минерала с низкими деблокирующими температурами (около 200 °C). К третьей мы отнесли фрагменты с сочетанием (титано)магнетита и двух видов магнитожестких минералов с низкими (около 200 °C) и высокими (порядка 660 – 680 °C) деблокирующими температурами (рис. 2.3.2.). Терромагнит-

ные анализы магнитной восприимчивости и/или намагниченности насыщения показали высокую стабильность магнитных свойств образцов к нагреву до высоких температур.

Лишь на небольшой части фрагментов наблюдалось значимое (более 10 %) различие кривых нагрева и охлаждения, соответственно, они были исключены из дальнейших исследований (рис. 2.3.3.).

Определение палеонапряженности проводилось по протоколу «Триакс» специально разработанному для трехосного вибрационного магнетометра [Le Goff, Gallet, 2004], сконструированного в Парижском институте физики Земли. Инструмент позволяет выполнять серии непрерывных высокотемпературных нагревов и создавать магнитное поле в любом направлении. Протокол предусматривает корректировку эффекта скорости охлаждения и учет анизотропии термоостаточной намагниченности путем создания лабораторной термонамагниченности в направлении разрушенной естественной остаточной намагниченности. При этом, в первом приближении вычисление напряженности можно представить, как величину лабораторного поля, умноженную на отношение спадов естественной остаточной намагниченности и термоостаточной намагниченности, созданной в лаборатории.

Определение выполнялось в температурном интервале от 175 до 440/520 °C в полях от 50 до 65 мкТл. Всего было исследовано порядка 600 образцов, при этом результаты были получены всего по 346 образцам, соответствующим 78 фрагментам из 16 разновозрастных памятников; на рис. 2.3.4. показаны примеры определений для двух памятников.

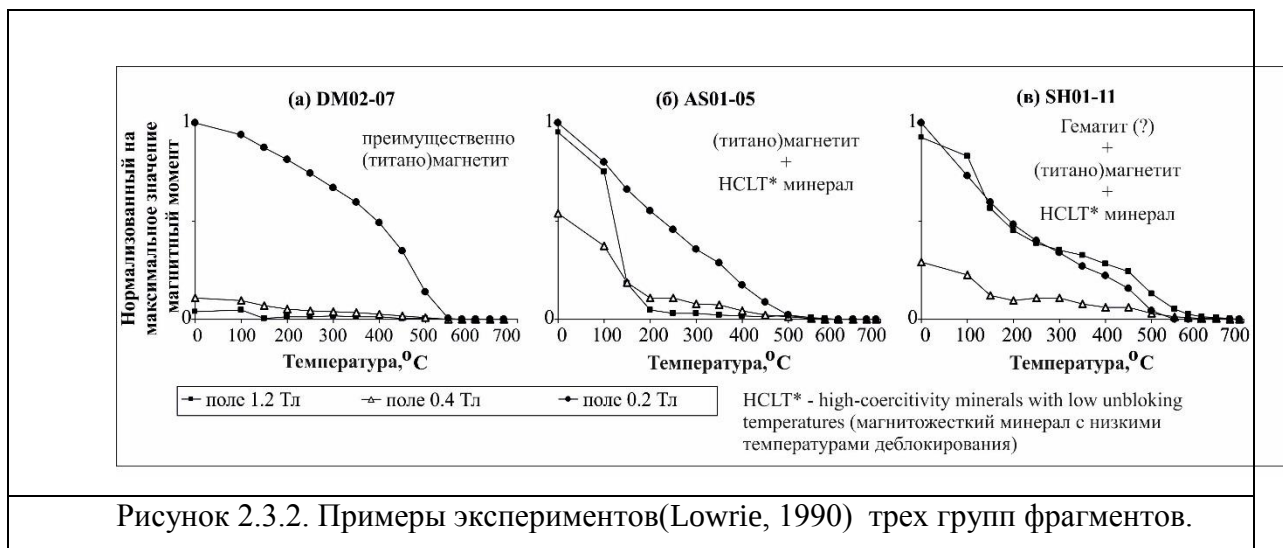
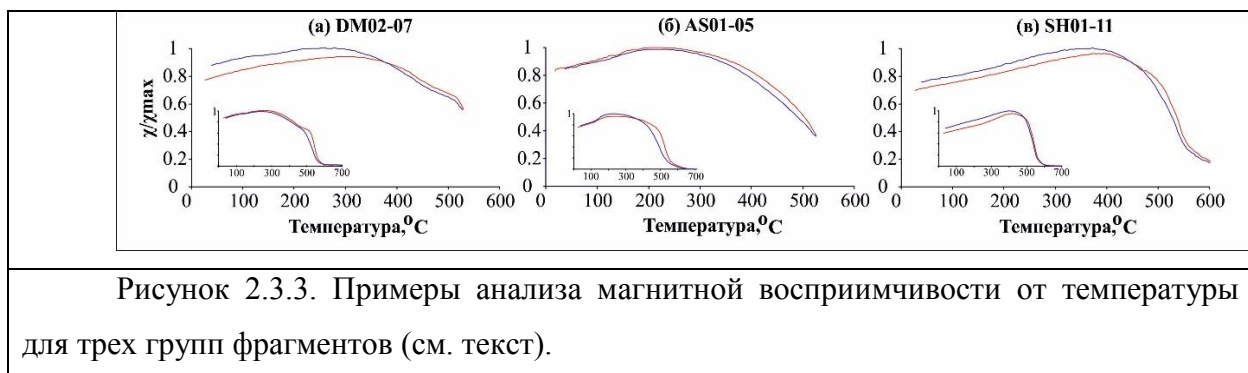
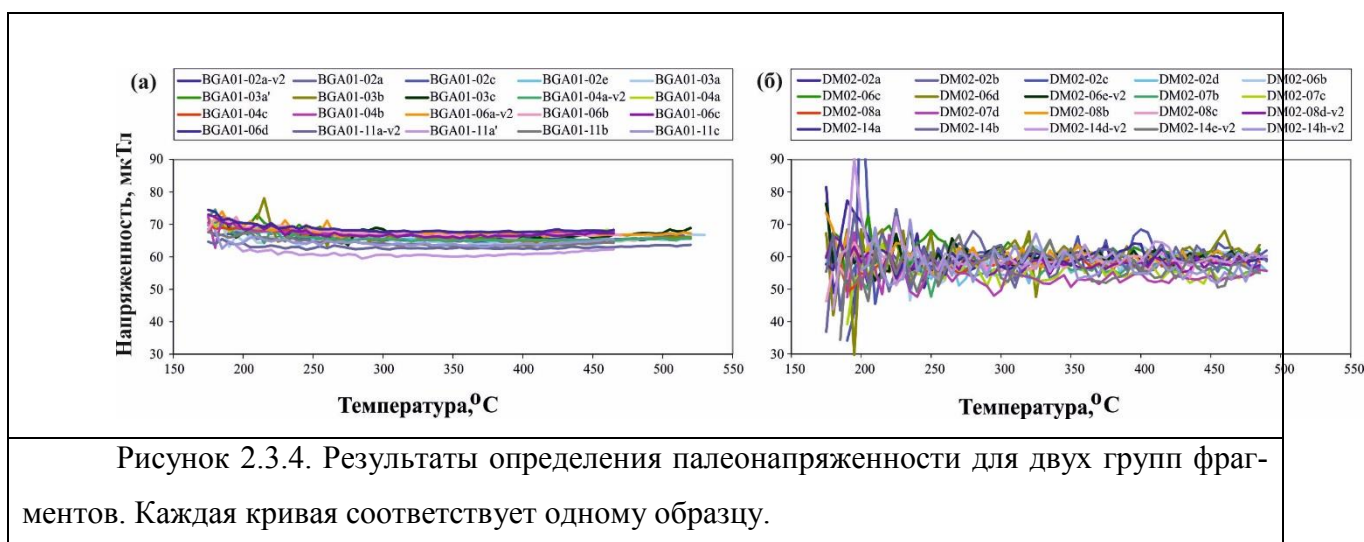


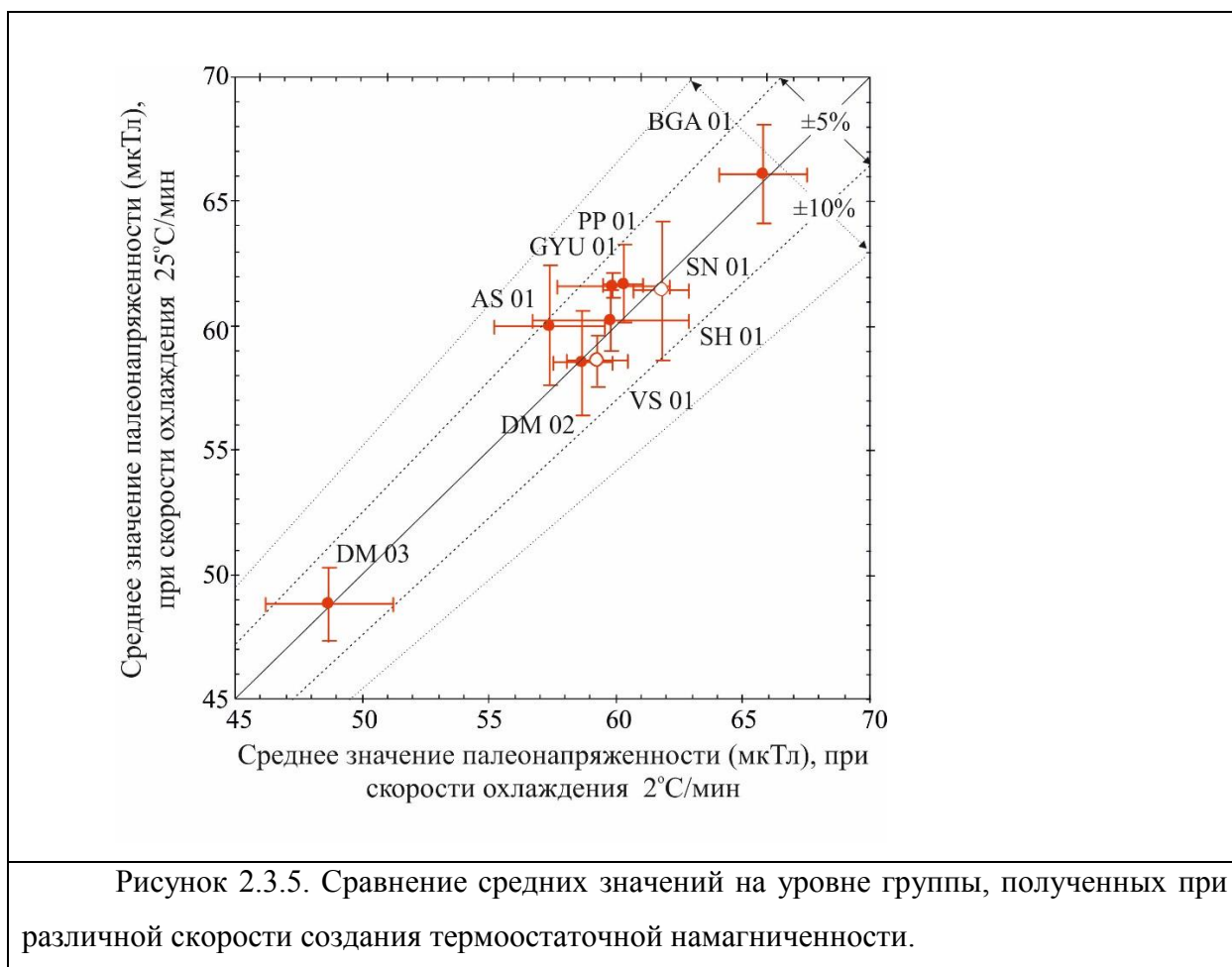
Рисунок 2.3.2. Примеры экспериментов (Lowrie, 1990) трех групп фрагментов.



При изучении археомагнитных коллекций основными проблемами являлись низкая естественная остаточная намагниченность образцов и сильное влияние эффекта скорости охлаждения. Влияние последнего, видимо, характерно для большинства обожженных глиняных кирпичей, изготовленных в Великом Новгороде и Ярославской области. Для контроля качества получаемых результатов были выполнены серии экспериментов с более низкой (2 °C/мин), по сравнению с обычной (25 °C/мин) скоростью создания лабораторной термоостаточной намагниченности. Результаты показали более стабильное поведение напряженности в зависимости от температуры, что, впрочем, зачастую, не отражалось на точности определения палеонапряженности. Сравнение результатов не выявило сильного различия средних значений, вычисленных для разных скоростей охлаждения (рис. 2.3.5.). Скорее всего, это связано с тем, что разброс значений в группе превышает влияние самого эффекта.



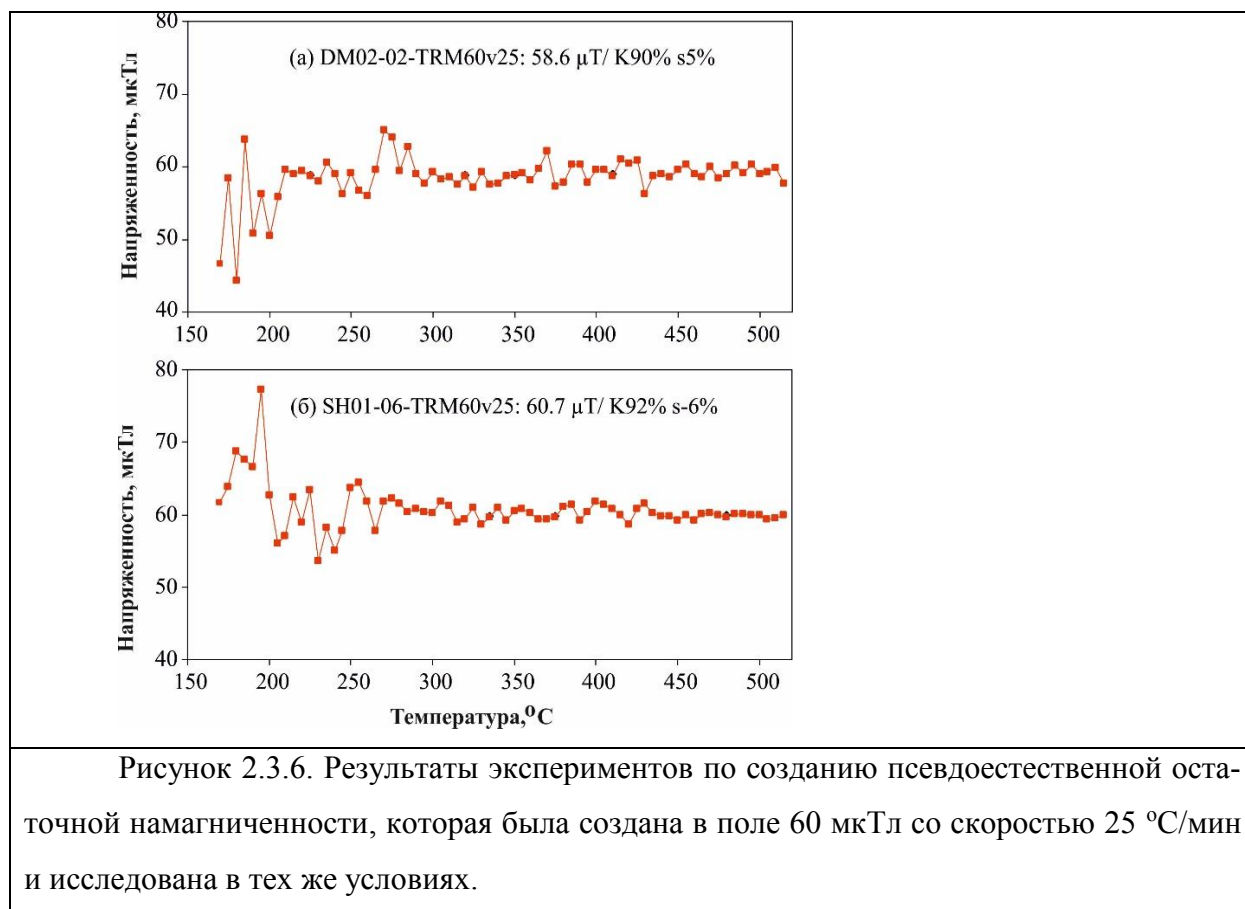
В связи с тем, что образцы третьей группы содержат высококоэрцитивный минерал с высокими деблокирующими температурами (гематит?), нами была выполнена дополнительная проверка надежности определений, получаемых по образцам этой группы. Для этого были выполнены серии экспериментов по созданию псевдоестественной остаточной намагниченности в известных условиях (поле, скорости) на образцах, соответствующих третьей группе, и затем, проведение обычной процедуры определения палеонапряженности по протоколу «Триакс». Результаты исследований показывают, что эти образцы вполне подходят для определений палеонапряженности (рис. 2.3.6.).



Выводы:

Определения палеонапряженности получены по 16 различным группам (девяти памятникам Великого Новгорода; пяти Ярославской области и двум Московской области). Полученные данные находятся в интервале от 46.8 до 66.1 мкТл, датированные от начала 11 века до первой трети 19 века. Точность определений составила от 0.3 до 4.5 % от среднего по группе, в абсолютном выражении от 0.6 до 2.6 мкТл, что соответствует всем при-

нятым критериям. Для одной группы было исследовано от трех до шести фрагментов и от трех до шести образцов на каждый фрагмент.



Полученные данные палеонапряженности по Центральной части России (рис. 2.3.7.):

1) свидетельствуют в пользу того, что в интервале времени между XII и XVIII вв н.э. на Северо-Западе России отсутствовали сильные и быстрые вариации геомагнитного поля, подобные тем, которые были ранее получены для Центральной части России [Burlatskaya et. al., 1986; Nachasova, 1972] и для юго-восточной Европы (преимущественно Болгарии, [Kovacheva et. al., 2014]). Эволюция напряженности геомагнитного поля здесь в это время характеризовалась нисходящим трендом, на который накладывается несколько пиков небольшой амплитуды, каждый длительностью около 100 лет;

2) хорошо согласуются с эталонной кривой по Франции [Genevey et al., 2013; Genevey et al., 2016], переведенной на координаты Новгорода. Это является веским доводом в пользу однородности магнитного поля на территории Европы в интервале с начала XI по первую треть XIX вв. и, соответственно, отсутствию значительного влияния недипольных источников поля.

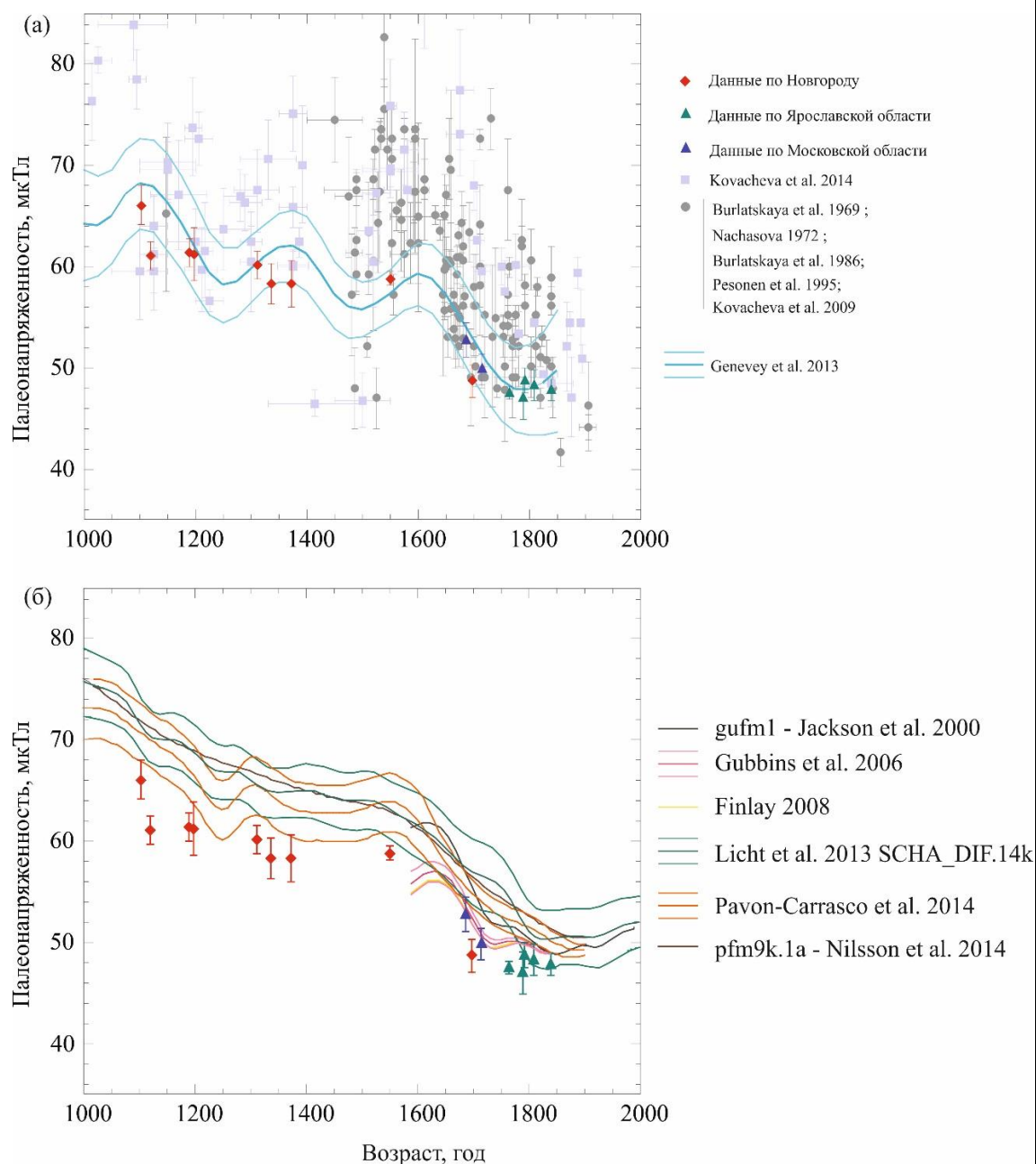


Рисунок 2.3.7. сравнение определений, полученных в ходе проекта с (а) данными по Центральной части России и Болгарии, а также с эталонной кривой поведения напряженности по Франции; (б) численными моделями магнитного поля Земли.

3) систематически ниже значений, предполагаемых численными моделями геомагнитного поля [Jackson et. al., 2000; Gubbins et. al., 2006; Finlay, 2008; Licht et. al., 2013; Nilsson et. al., 2014] для этого периода. Причиной тому могут служить большая территориальная неоднородность данных на основе которых построены модели. Новые данные с малоизученных территорий, к которым относится и Европейская часть России, могут служить

дополнительным ограничением для построения новых и корректировки имеющихся моделей.

2.4. Эволюция геомагнитного поля на территории Ближнего Востока и Средней Азии на протяжении голоцена.

Актуальность. Эпизоды быстрых вариаций геомагнитного поля являются одной из основных тем, активно обсуждаемых в современном геомагнитном и палеомагнитном сообществах. Растет число археомагнитных исследований, выявляющих наличие таких эпизодов на протяжении последних тысячелетий (например, [Ben-Yosef et al., 2009; Hartmann et al., 2010; Shaar et al., 2011; Ertepinar et al., 2012; Fanjat et al., 2013; Gallet et al., 2014, 2015; Genevey et al., 2016; Cai et al., 2016, etc.]). При этом, Ben-Yosef с соавторами (2009) и Shaar с соавторами (2011) выявили наличие ясных всплесков напряженности геомагнитного поля на протяжении 1-го тысячелетия до н.э., характеризующихся скоростью вариаций $\sim 4.5 \mu\text{T}$ в год в течение нескольких десятков лет, что в десятки раз превышает величины, получаемые по современным измерениям [Livermore et al., 2014]. Данные геомагнитные события были охарактеризованы как геомагнитные спайки [Ben-Yosef et al., 2009]. В последующие годы значительно увеличилось число исследований, направленных на их выявление и понимание из природы (см. [Livermore et al., 2014; Fournier et al., 2015]). Gallet с соавторами [Gallet et al., 2003] описали другую группу геомагнитных событий, археомагнитных джерков, – характеризующуюся всплеском напряженности геомагнитного поля, сопровождающимся резкими изменениями направлений на протяжении нескольких веков. Авторами было проведено исследование о связи этих геомагнитных событий с периодами преобладания эксцентрического осевого диполя [Gallet et al., 2009].

Очевидно, что данные события играют ключевую роль в понимании механизма геодинамо, продуцирующего магнитное поле Земли, в изучении распределения течений внутри земного ядра [Livermore et al., 2014]; в исследовании структуры поля и взаимодействия его компонент, в изучении эволюции диполя (см. [Korte and Constable, 2005; Korte et al., 2011; Constable et al. 2011]).

Однако существующие в настоящее время глобальные модели геомагнитного поля не могут предоставить необходимого разрешения, чтобы надежно зафиксировать короткопериодические события в геомагнитной летописи из-за недостаточного количества высококачественных палео- и археомагнитных данных [Korte and Constable 2003, 2005]. При этом, несмотря на то, что число исследований быстрых вариаций на протяжении последних трех тысячелетий за последние годы значительно возросло, данные для более ранних периодов все еще не достаточны [Gallet et al., 2014, 2015]. Это связано в основном с отсутствием материала, удовлетворяющего основным критериям археомагнитных исследова-

ний [Genevey et al., 2008]. В данном контексте, наше исследование является в высокой степени приоритетным, т.к. позволяет решить ряд важных задач, в частности построение региональной кривой вариаций геомагнитного поля практически на всем протяжении голоцена для территории Ближнего Востока и Средней Азии – одного из самых богатых в археологическом плане регионов.

Цели и задачи. Основная цель выполняемых работ состоит в изучении эволюции геомагнитного поля на протяжении голоцена на территории Ближнего Востока и Средней Азии. В рамках данного проекта было проведено несколько исследований, позволяющих изучить весь спектр вариаций напряженности и направлений геомагнитного поля на протяжении исторического времени, их взаимосвязь с палеоклиматическими и палеогеографическими обстановками, другими геологическими и планетарными процессами, а также, через это, влияния изменений магнитного поля Земли на жизнь древних человеческих обществ.

Для достижения основной цели исследования, нами были поставлены и выполнены следующие задачи:

i) Построение детальной региональной кривой вариаций археонапряженности геомагнитного поля на территории Ближнего Востока на протяжении последних ~ 9000 лет:

- Измерение высококачественных хорошо датированных образцов керамических изделий из археологических памятников Северного Ирака (Ярым Тепе 1 и 2), датированных 7-м и 6-м тысячелетиями до н.э.

- Анализ полученных данных, сравнение их с данными, полученными ранее при изучении региона [Gallet et al., 2015]

ii) Построение детальной кумулятивной кривой вариаций напряженности и направлений геомагнитного поля на территории Средней Азии на протяжении последних ~5000 лет.

- Отбор и палеомагнитное измерение ориентированных образцов пород такырных отложений на территории западного Туркменистана;

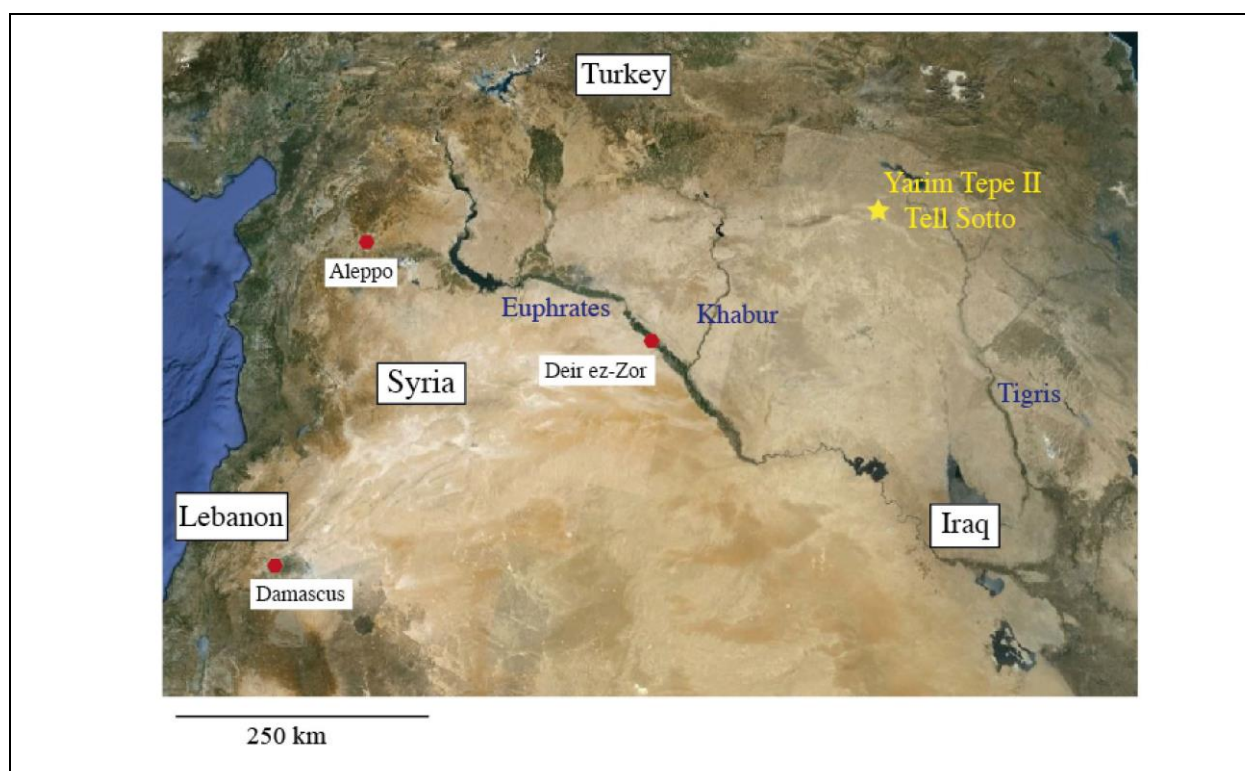
- Проведение дополнительных анализов направленных на изучение геохимических и петрофизических свойств пород, а также проведение датировок с использованием передовых технологий.

Объекты исследований.

Ближний Восток с его богатым культурным и историческим наследием и высокой степенью археологической изученности является идеальным регионом для проведения

археоманитных исследований. Северная Месопотамия была регионом становления раннеземледельческой культуры в позднем неолите. Этот этап, именуемый «великой неолитической революцией» [Мунчаев, Мерперт, 1981], сопровождается появлением керамики. Отсюда гончарное производство затем распространяется во все соседние регионы. Наиболее древние фрагменты керамических изделий, найденные в Междуречье, датируются около 7000 лет до н.э. [Nieuwenhuys, 2010, 2013]. Таким образом, результаты определения археонапряженности, полученные при изучении археологических памятников Северной Месопотамии, позволят проследить наиболее длинную и подробную археоманитную летопись, охватывающую практически весь голоцен.

Результаты археонапряженности были получены по датированным фрагментам керамических изделий, отобранным советской экспедицией в Ираке с 1969 по 1976 гг. из археологических памятников Ярм Тепе 1 и 2. Памятники находятся на территории Северного Ирака, в современной провинции Нинава, недалеко от г. Мосул (рис. 2.4.1.).



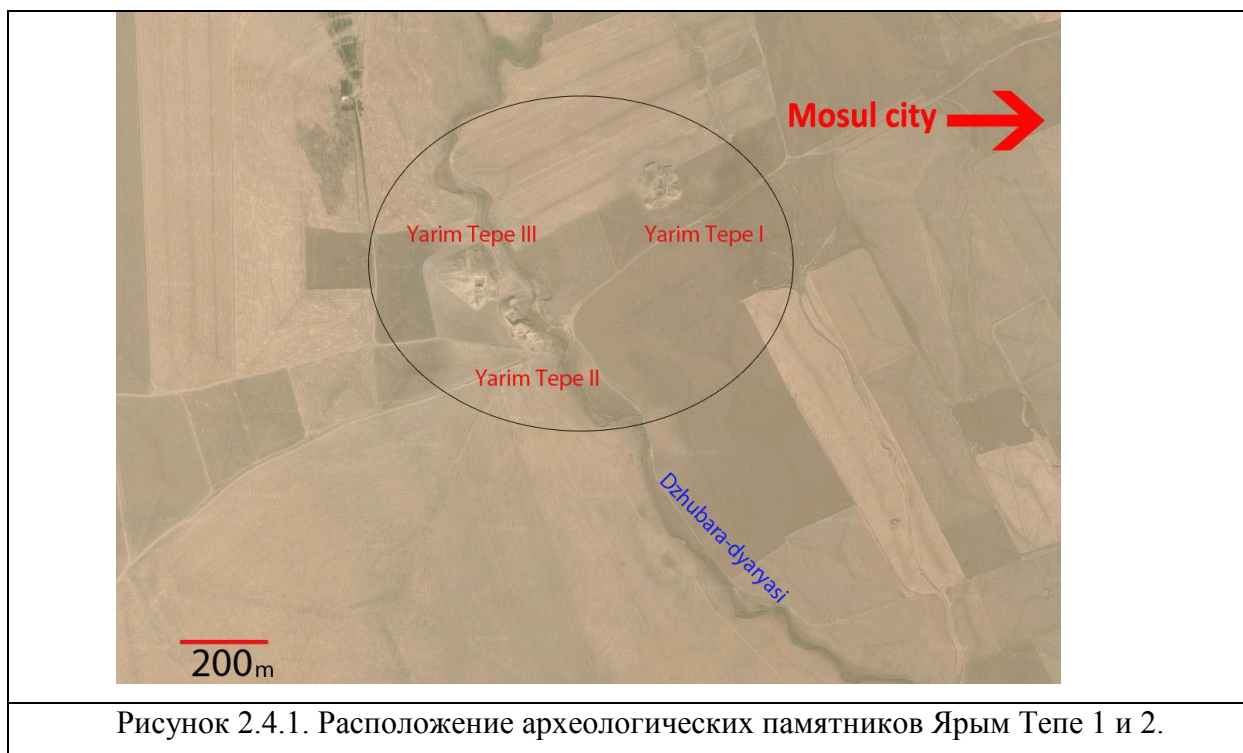


Рисунок 2.4.1. Расположение археологических памятников Ярым Тепе 1 и 2.

Ярым Тепе 1, датированный ~6300 – 5900 лет до н.э. [Molist et al., 2013], представляет собой древнее многослойное поселение Хассунского периода позднего неолита. Шестиметровая толща культурных отложений археологическими методами разделена на 12 строительных горизонтов. Ярым Тепе 2 – многослойное поселение Халафского периода позднего неолита (~5950 – 5300 лет до н.э.), представляет собой 7-ми метровую толщу культурных отложений, разделенных на 9 строительных горизонтов. Нами было отобрано 22 группы фрагментов из памятника Ярым Тепе 1 и 29 групп из памятника Ярым Тепе 2. Каждая группа состоит минимум из трех (до десяти) фрагментов (рис. 2.4.2.). Образцы были отобраны из последовательных стратиграфических уровней, мощностью около 20 см.



Рисунок 2.4.2. Фрагменты керамических изделий Халафского периода (Ярым Тепе 2).

Объектом палеомагнитного исследования стала толща такырных отложений на западе Туркменистана, в Балканабатском велаяте, в районе с. Даната (рис. 2.4.3.). Такырные отложения представляет собой тонкослоистую толщу годовичных варв: осадков, сносимых в сезон дождей с хребта Малый Балхан и западной оконечности Карадагской горной цепи в межгорную депрессию, с компенсированным прогибанием, расположенную между ними.

Каждый слой имеет мощность ~1 мм и представляет один год осадконакопления. Вся толща накапливалась примерно 4,5 тысячи лет. Детальное расчленение и датирование разреза построено на хронологии варв, что позволяет получить очень высокое временное разрешение (первые декады) палеомагнитной кривой, построенной в результате исследования (рис. 2.4.4.).

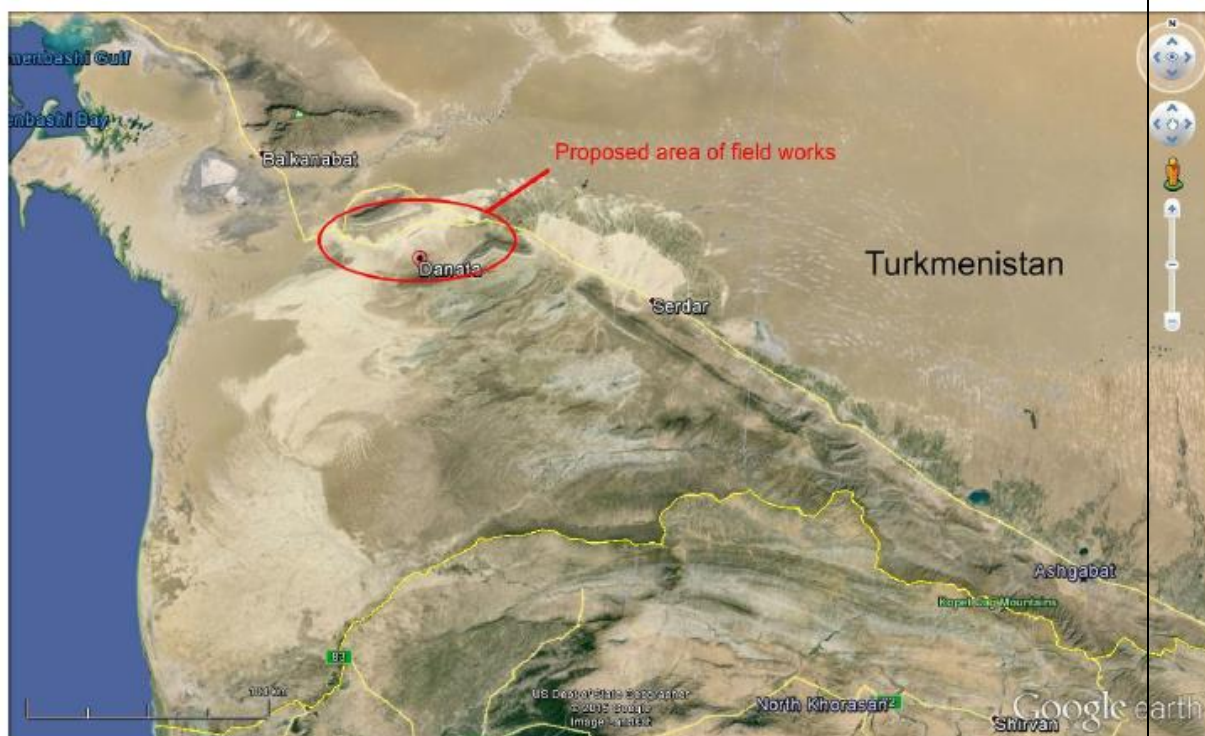


Рисунок 2.4.3. Положение района работ в Туркменистане.

Во время полевых работ, организованных в начале лета 2016 г., при помощи бульдозера было заложено три траншеи, две из которых оказались наиболее приемлемыми для отбора образцов. Мощность такырных отложений в первой траншее составляет около 5-ти метров, во второй – около 4,5 метра (рис. 2.4.5. а, б). Нами было отобрано 45 ориентированных блоков из первой и 51 блок пород из второй траншеи. Размеры блоков ~ 10x20x10 см. Кроме того, были отобраны образцы на дополнительные анализы (гранулометрия, геохимия, тефрохронология, датирование с помощью оптически-стимулированной люминесценции и радиоуглеродным методом).

Методика

Определения археонапряженности были получены с использованием оборудования палеомагнитной лаборатории Института Физики Земли Парижа (IPGP, France): трехосного вибрационного магнитометра Триакс, позволяющего проводить измерения на цилиндрических ($<1 \text{ см}^3$) образцах, и написанного для него протокола [Le Goff, Gallet, 2004; рис. 2.4.6.]. В основе методики измерений лежит метод Телье-Телье [Thellier E. et Thellier O., 1959], заключающийся в замещении естественной остаточной намагниченности (NRM), полученной изделиями в процессе остывания после обжига, новой термоостаточной намагниченностью (TRM) в условиях заданного лабораторного магнитного поля.



Рисунок 2.4.4. Годичные слои – варвы, – в разрезе такырных отложений.

Процедура измерения состоит из 5 последовательных непрерывных циклов нагрева (как правило до 520°C) и охлаждения. Данная процедура позволяет непосредственно в процессе эксперимента делать поправку за анизотропию термоостаточной намагниченности и т.н. эффект коэффициента охлаждения (cooling rate effect) (см. [Le Goff et Gallet, 2004]). На рис. 2.4.7. показан пример данных археонапряженности, полученных с помощью данного протокола. Из каждого фрагмента измерялось не менее трех образцов, таким образом, каждая кривая представляет собой определения археонапряженности, усредненное на уровне фрагмента.



Рисунок 2.4.5. Траншеи, заложенные для отбора образцов во время полевых работ Туркменистане в июне 2016 года: а – траншея, б – штурф для отбора ориентированных блоков пород и уровни, отмеченные для отбора проб на ОСЛ (см. текст)

В соответствии с существующими требованиями надежности и качества археомагнитных данных [Genevey et al., 2008] были проведены дополнительные анализы, включающие измерение температурной зависимости магнитной восприимчивости в низких полях

для исключения изменения магнитной минералогии в процессе нагревов (рис. 2.4.8. а), а также было произведено измерение основных магнитных свойств материала для выявления состава носителей магнитного сигнала и их характеристик (рис. 2.4.8. б, в).



Помимо этого, в лаборатории Beta analytics (Майами, США) было произведено радиоуглеродное датирование фрагментов костей и зубов, отобранных с различных стратиграфических уровней.

Палеомагнитный анализ такырных отложений планируется выполнить в течение 2017 г. Он будет выполняться с использованием криогенного магнитометра фирмы 2G, находящегося в палеомагнитной лаборатории IPGP, который позволяет проводить измерение образцов кубической формы ($\sim 2\text{см}^3$) по 10 штук за эксперимент.

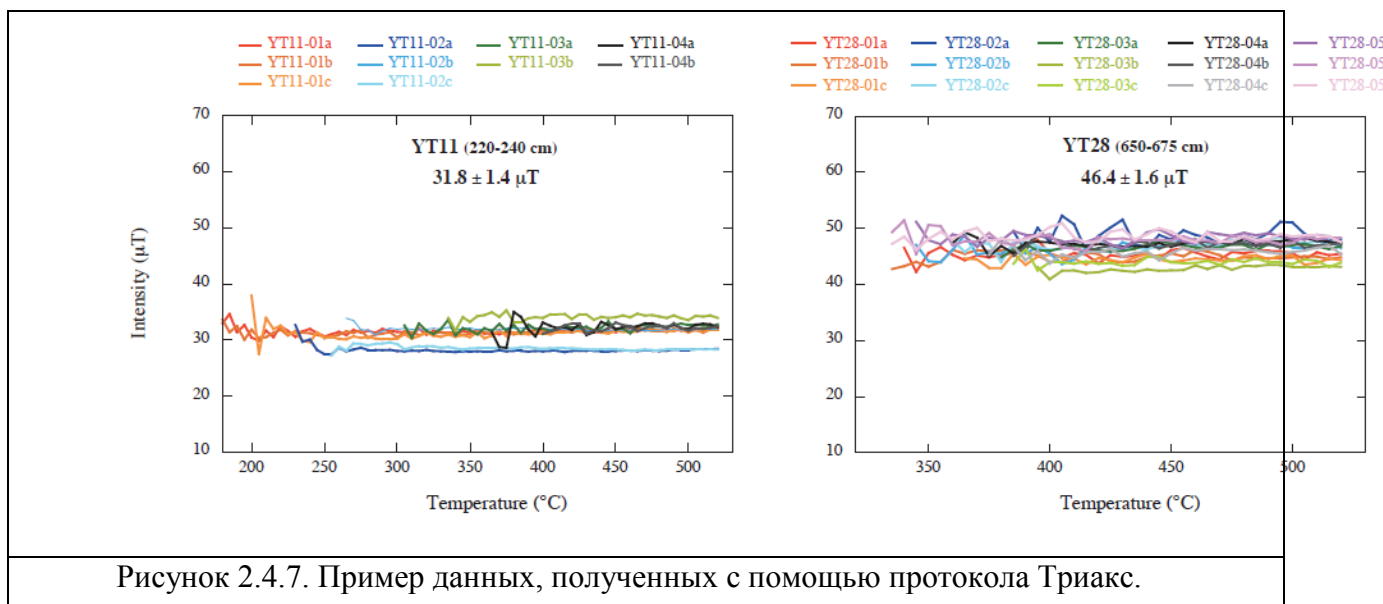


Рисунок 2.4.7. Пример данных, полученных с помощью протокола Триакс.

Анализ магнитной минералогии производится с использованием оборудования палеомагнитной лаборатории ИФЗ РАН – вибрационного магнитометра VSM, позволяющим измерять порошкообразные образцы, фрагменты пород очень маленького размера, а также каппометра MFK-1 с приставкой CS-3 для измерения анизотропии и температурной зависимости магнитной восприимчивости.

Осенью 2016 г. было произведено датирование с использованием оптически стимулированной люминесценции. Анализ производился в лаборатории люминесценции Университета Аархус (Aarhus University) на базе Датского Технологического Института (DTU, Riso, Denmark). Образцы, отобранные во время проведения полевых работ в июне 2016, были подготовлены к исследованию с выделением различных фракций кварца и полевого шпата при последовательном промывании осадка в различных жидкостях (H_2O , HCl , H_2O_2 , HF , тяжелая жидкость); после этого было произведено измерение дозы накопленной радиации при помощи техники SARA (single aliquot regenerative with added dose – восстановленная одинарная аликвота с добавочной дозой радиации), погрешность которой для современных (последние несколько тысячелетий) осадков составляет менее

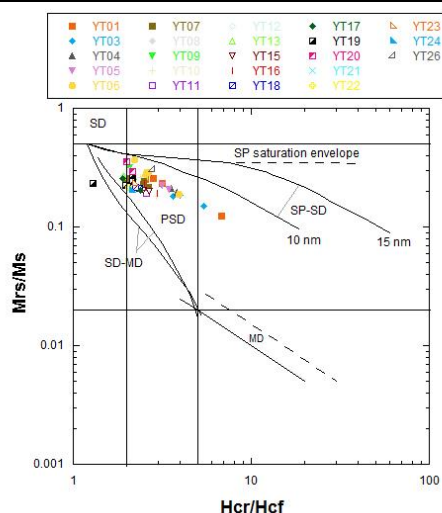
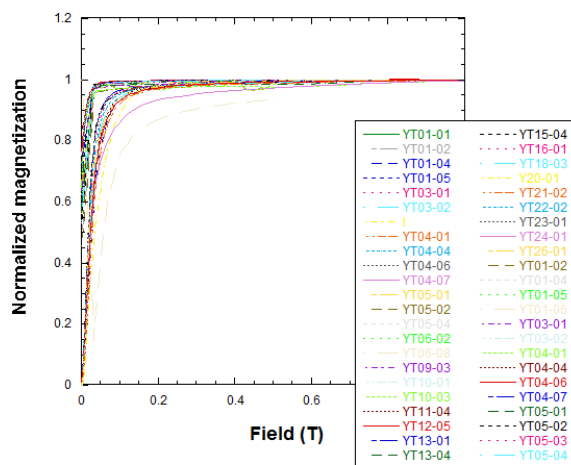
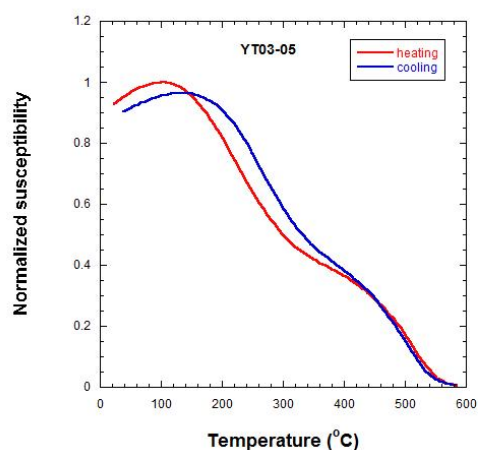


Рисунок 2.4.8. Магнитные свойства минералов, входящих в состав материала, из которого изготовлены изучаемые фрагменты: а – пример температурной зависимости магнитной восприимчивости, б – кривые изотермической остаточной намагниченности, в – диаграмма Дзя – Данлопа.

10% (рис. 2.4.9. а, б; [Murray et al., 2007; Buylaert, 2012]). Всего было исследовано 9 образцов.

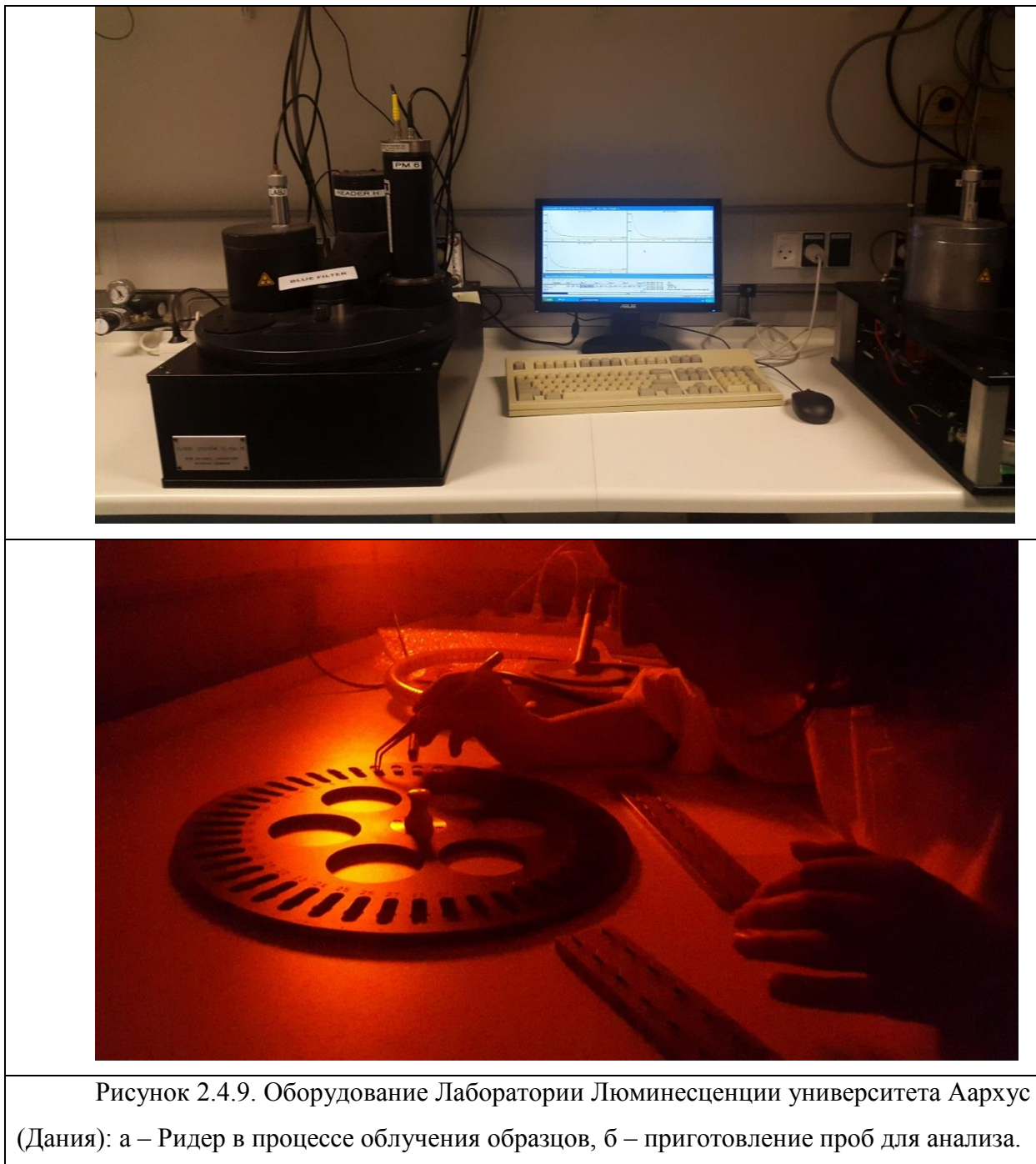


Рисунок 2.4.9. Оборудование Лаборатории Люминесценции университета Аархус (Дания): а – Ридер в процессе облучения образцов, б – приготовление проб для анализа.

Результаты

Результаты определения археонапряженности.

Новые данные по археонапряженности, полученные по керамическим фрагментам из Ярым Тепе 2, показаны на рис. 2.4.10. в соответствии с их стратиграфическим положе-

нием: значения, усредненные на уровне фрагмента (а) до того, как были усреднены на уровне группы фрагментов (б).

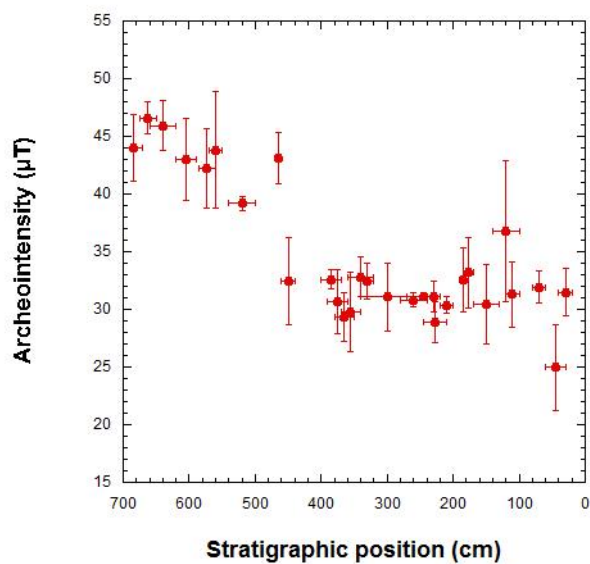
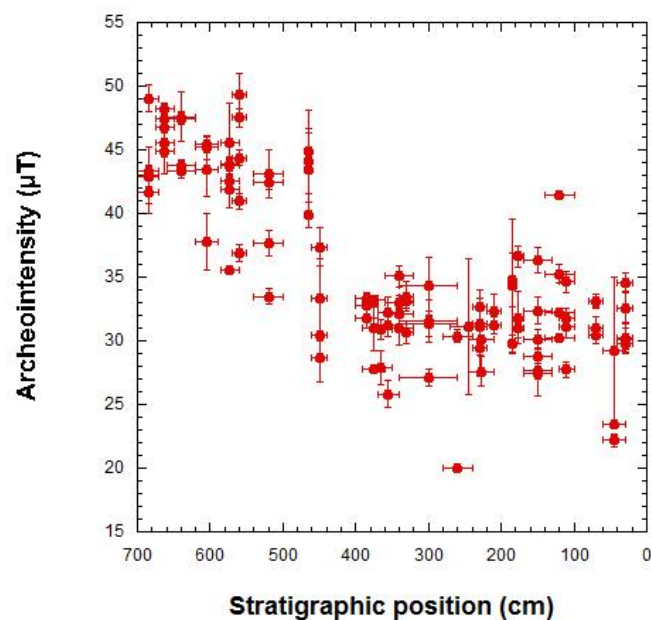


Рисунок 2.4.10. Новые данные археонапряженности, полученные по археологическому памятнику Ярым Тепе 2: а – значения, усредненные на уровне фрагмента и б – на уровне группы фрагментов.

Всего было исследовано 157 фрагментов, из которых 122 показали удовлетворительные результаты археонапряженности. Из них 110 определений оказались удовлетворительными в результате стандартного 3σ теста, а также имеют стандартное отклонение не более $5\mu\text{T}$. Таким образом, коэффициент результативности данной коллекции составляет $\sim 70\%$, что довольно близко к полученному Gallet с соавторами при изучении археологических памятников Халафской культуры в Сирии [Gallet et al., 2015].

На рис. 2.4.10. а видно, что определения археонапряженности внутри отдельной группы фрагментов имеют значительный разброс даже после исключения потенциальных аутсайдеров, что может говорить в пользу наличия быстрых вариаций геомагнитного поля в данном периоде. Кроме того, на рис. 2.4.10. б, помимо ясного тренда к снижению напряженности на протяжении 6-го тысячелетия до н.э., отчетливо виден ступенчатый характер эволюции геомагнитного поля, с падением значений напряженности почти на $15\mu\text{T}$ в течение пары декад.

Новые данные археонапряженности, полученные при изучении фрагментов из Ярым Тепе 1 показаны на рис. 2.4.11. а-б. Данные также были усреднены на уровне фрагмента (а) прежде, чем быть усредненными на уровне группы фрагментов (б). Коэффициент результативности в данной коллекции немного ниже: $\sim 69\%$. На данном этапе было измерено 14 групп общим числом в 53 фрагмента, из которых удовлетворительные значения (после всех тестов) показали 36 фрагментов. Причиной этому может служить значительно более низкое качество керамических изделий: глиняный материал менее гомогенный, хуже приготовлен; условия обжига отличаются (возможно, обжиг производится при более низких температурах). Тем не менее, данный результат по-прежнему выше других применяемых на сегодняшний день техник [Gallet et al., 2015] когда в расчет принимается набор критериев [Genevey et al, 2008].

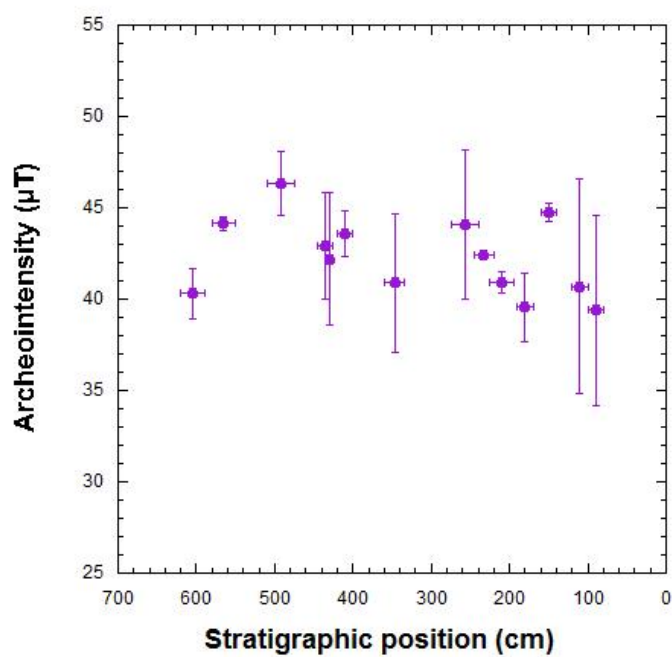
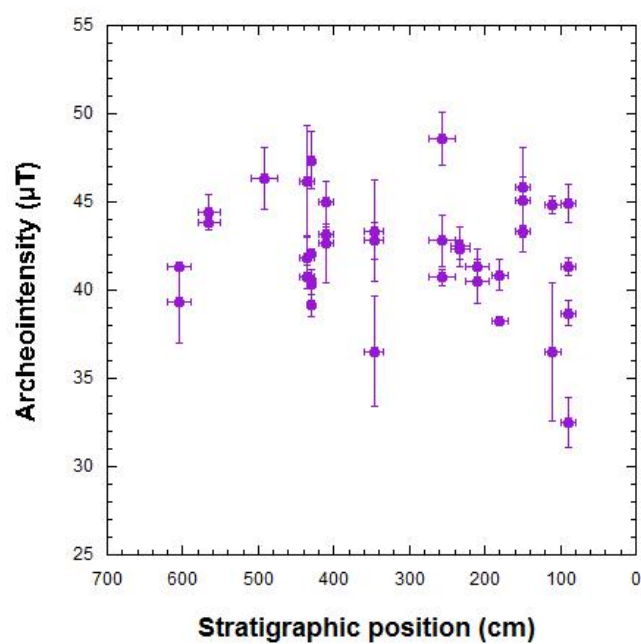


Рисунок 2.4.11. Новые данные археонапряженности, полученные по археологическому памятнику Ярым Тепе 1: а – значения, усредненные на уровне фрагмента и б – на уровне группы фрагментов.

Сравнение новых данных археонапряженности с данными для 7-го и 6-го тысячелетий до н.э., полученными при изучении археологических памятников Сирии (Телль Халула, Телль Мазаикх [Gallet et al., 2015]) и Болгарии [Kovacheva et al., 2014] показало, что в то время как данные по Ярым Тепе 1 для 7-го тысячелетия хорошо согласуются с уже опубликованными данными, в археомагнитной записи Ярым Тепе 2 наблюдается некоторое несовпадение с сирийскими и болгарскими данными. Нами было предпринято два подхода для решения данного вопроса, в основе которых лежала целостность археологического разреза Ярым Тепе 2.

На рис. 2.4.12. а-в показана рекалибровка археологического разреза Ярым Тепе 2. На основании наилучшей согласованности всех доступных археомагнитных данных и предположения о том, что накопление культурных отложений шло непрерывно, наиболее вероятным временем оккупации поселения представляется поздний Халафский период (~5550 – 5300 лет до н.э.). Эта опция подтверждает наличие узкого пика напряженности около 5500 лет до н.э., наблюдаемого в сирийских и болгарских данных археонапряженности. При этом, скорость вариаций на данном отрезке составляет $\sim 0.35 - 0.15 \mu\text{T}$ в год, что несколько превышает скорость, рассчитанную для современного поля (максимальная $\sim 0.12 \mu\text{T}$ в год; [Livermore et al., 2014]).

Второй подход основан на предположении о том, что разрез Ярым Тепе 2 содержит перерыв. Это может объяснить ясный ступенчатый характер эволюции поля, а также отсутствие в археомагнитной летописи Ярым Тепе 2 пика напряженности в районе 5500 лет до н.э., наблюдаемого в остальных наборах данных, доступным для этого периода.

На данном этапе второй вариант считается наиболее вероятным. Однако, ожидаемые результаты радиоуглеродного датирования, а также новые данные археонапряженности, полученные по образцам, дополнительно отобраным из коллекции Ярым Тепе 2, позволят сделать окончательный вывод.

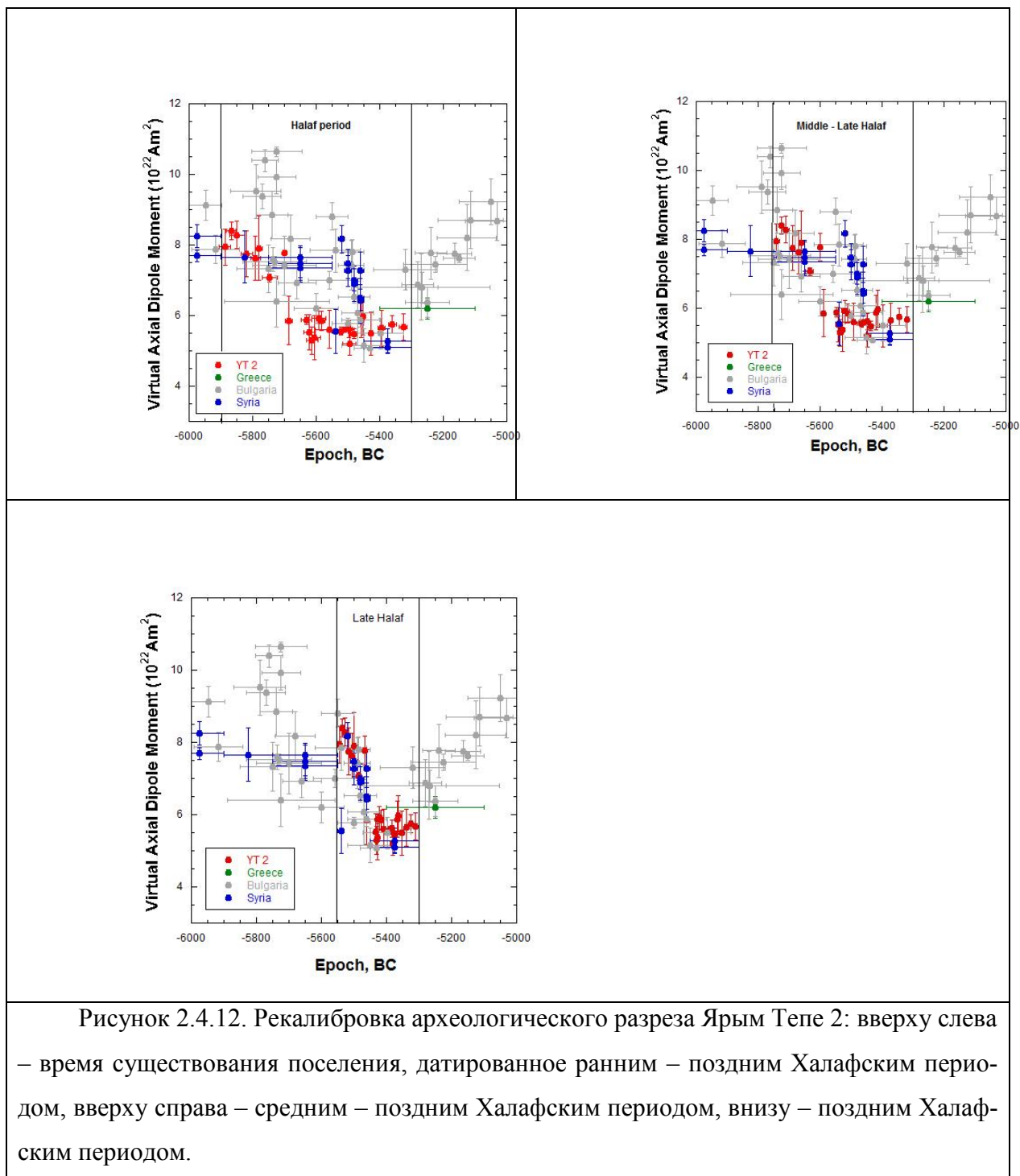


Рисунок 2.4.12. Рекалибровка археологического разреза Ярым Тепе 2: верху слева – время существования поселения, датированное ранним – поздним Халафским периодом, верху справа – средним – поздним Халафским периодом, внизу – поздним Халафским периодом.

Палеомагнитное исследование такырных отложений.

На основании литературных сведений о результатах, проведенных ранее на территории Средней Азии палеомагнитных исследований (см., например, [Nurgaliev et al., 1996]), есть веское основание ожидать получения данных высокого качества, при изучении которых можно будет проследить основные закономерности эволюции поведения геомагнитного поля, выделить эпизоды резкого изменения его характеристик с последу-

ющим изучением природы данных явлений и их связи с другими геологическими процессами. В частности, Nilsson с соавторами (2016) при построении глобальной модели вариаций геомагнитного поля указывают на наличие эпизода резкого изменения направлений около ~2200 – 2500 лет до н.э. Этот эпизод совпадает с таковым, выявленным в данных, полученных ранее по Туркменистану В.М. Трубиным (1983 г., данные не опубликованы).

На данном этапе были получены первые результаты магнитной минералогии. Результаты измерения изотермической остаточной намагниченности, петель гистерезиса, магнитной восприимчивости как функции температуры показали, что магнитный сигнал в основном связан с псевдооднодоменными зернами магнетита, возможно с примесью титаномагнетитов.

Получены первые данные по датировкам с помощью ОСЛ. Данные подтверждают возраст разреза, ранее установленный В.М. Трубиным на основании варвохронологии. Погрешность измерения колеблется по разрезу, т.к. данная техника применительно к современным осадкам еще не до конца отработана, в частности необходимо усовершенствовать действующий протокол, разработанный для измерения накопленной дозы радиации в четвертичных отложениях (в данном аспекте изучаемые отложения представляют отдельный интерес в перспективе выработки нового высокоточного инструмента датирования).

Основные выводы

- 7-е и 6-е тысячелетия до н.э. на территории Ближнего Востока были отмечены тенденцией к снижению напряженности геомагнитного поля;
- На фоне общего тренда было выявлено наличие быстрых вариаций археонапряженности, с наличием как минимум одного эпизода значительных вариаций, характеризующихся скоростью ~0.35 – 0.15 μT в год;
- Данное геомагнитное событие может быть отнесено к группе т.н. археомагнитных джерков. Для подтверждения этого события необходимо получить дополнительные данные по вариациям направлений геомагнитного поля на протяжении изучаемого периода;
- Голоценовые отложения на территории Средней Азии представляют собой потенциально перспективный объект для усовершенствования протокола ОСЛ, разработанного и успешно применяемого для датирования более древних отложений;
- Датирование такырных отложений, основанное на суперпозиции годичных варв, подтверждается предварительными данными, полученными при ОСЛ датировании;

- Дальнейшее исследование эволюции геомагнитного поля на территории Среднего Востока представляет повышенный интерес в различных аспектах, с основными приложениями как в палео- и геомагнетизме, так и в археологии.

2.5. Разработка глобальной модели геомагнитного поля голоцена.

Введение.

Палеомагнитные данные за последние 10 тысяч лет выделяются по сравнению с такими же, но более древними данными сравнительно высокой представительностью и гораздо более точной привязкой по времени.

В рамках проведенной работы изучалась возможность проследить в масштабе всей Земли и промежутка времени порядка 10 тысяч лет динамику изменчивости Главного магнитного поля, то есть создать глобальную модель магнитного поля Земли в эпоху голоцена. Основная проблематика при построении магнитных моделей это вопрос об их точности в масштабах пространства и времени, в настоящем исследовании такие вопросы были решены применительно к существующим базам данных эпохи голоцена.

Актуальность

Построение модели по данным традиционно состоит в предъявлении зависимости от времени каждого (гауссова) коэффициента поля в разложении по сферическим гармоникам. Сам по себе процесс нахождения динамики сферических гармоник много лет было принято воспроизводить (с небольшими вариациями) с использованием подхода, изложенного в статье [Bloxham and Jackson, 1989], при этом, однако, достаточно хорошо известно, что при неудовлетворительной плотности географических точек, в которых измерен магнитный вектор, построение даже статической модели (то есть не предполагающей изменчивости коэффициентов во времени) дает большую неустойчивость при изменении пространственного расположения точек. Конкретная динамическая модель тем самым (как показывает сравнение результатов серии статей М.Корте с соавторами [Korte, Constable, 2003,2005,2011], [Korte et al, 2005,2009, 2011], а также непосредственный эксперимент на синтетических данных с предписанным поведением) подвержена значительным вариациям, вызванным пополнением баз данных, а потому вполне может оказаться весьма и весьма далекой от реальности.

В публикации 2013 года A. Licht, G.Hulot, Y.Gallet, E. Thébault [Licht et al, 2013] предложили использовать бутстрап и объявлять реалистичной моделью среднее по некоторому множеству вариаций данных, каждая вариация данных выбирается случайными возмущениями на само измерение и его время.

Было показано, что при большом (порядка тысячи) числе таких вариаций средняя модель гораздо более устойчива, хотя по-прежнему представительность и географические неравномерности вносят ошибки. Добавим, что в работе [Licht et al, 2013] модели для бутстрапа традиционно искали в классе разложения гауссовых коэффициентов по кубическим В-сплайнам, что для промежутка времени в 3000 лет и пятой степени разложения по гармоникам приводило к поиску экстремума в пространстве размерности 3500 – очевидно, что колоссальное количество неустойчивых эффектов потребовало значительных статистик для бутстрапа и приводило к тому, что подобного рода расчеты требовали нескольких недель и эффективно не могли быть проверены. С другой стороны, благодаря бутстрап-подходу, стало возможным оценить возможную ошибку конкретной модели (неопределенность вокруг среднего), что объяснило крайнюю неустойчивость моделей, опубликованных М.Корте.

Тем не менее, по-прежнему непонятна степень соответствия реального магнитного поля Земли и средней среди множественных реализаций модели. Кроме того, осталось непоясненным влияние на модель именно традиционного алгоритма и его параметров. Все эти особенности моделирования позволяют сказать, что задача моделирования с указанием явной точности и явной зависимости от предположений остается актуальной и сейчас, на что указывают самые последние публикации на эту тему [Nilsson et al., 2014; Panovska et al., 2015; Sanchez et al., 2016].

Цели

Цель настоящего исследования состояла в построении в рамках подхода бутстрапа модели и выяснении влияния на нее параметров моделирования, среди которых отметим прежде всего зависимость от пополнений базы магнитных измерений, представительность измерений во времени и пространстве в базе данных, вариации алгоритма за пределами описанного в статье [Bloxxham, Jackson, 1989] метода, а также точности измеренных данных. Поскольку магнитные данные в базах обычно приводятся с характеристиками точности, с целью учета влияния типа этих характеристик на ответ были проведены дополнительные исследования.

Исследовались, во-первых, свойств основных показателей этой точности для данных по направлениям – Maximal Deviation Angle и a_{95} , которые ранее иногда необоснованно приравнивали друг-другу, как например в статье [Korte et al., 2005].

Во-вторых, окончательная модель всегда дает значения, отличающиеся от измеренных реальных данных, соответствующие отклонения демонстрировали достаточно необычное негауссово статистическое поведение, отмеченное многими исследователя-

ми за последние 25 лет; исследование статистик этих отклонений и выявлении негауссовых типов ошибок также являлось целью исследований.

Задачи

Конкретные этапы исследования указанных актуальных вопросов составили следующую последовательность задач, которые были сформулированы и решены в рамках настоящей работы.

Во-первых, было разработано и реализовано несколько (а именно четыре) алгоритмов разной сложности – от усовершенствованного В-сплайнового разложения до простого метода кусочно-линейной по времени аппроксимации гауссовых коэффициентов. Написаны и отлажены соответствующие алгоритмы, которые благодаря нестандартным приемам программирования оказались приблизительно в 200-1000 раз более быстрыми по сравнению с программой [Licht et al., 2013].

Во-вторых, благодаря этому ускорению стало возможным аккуратно разобратся со статистикой моделей при бутстрапе (т.е. отвечающих различным вариациям данных), оценить зависимость от базы данных, от количественного соотношения представительности данных интенсивности и данных направлений, изучить эффекты влияния точности данных на ответ и т.д. При этом сравнивались результаты работы нескольких алгоритмов, достаточно сильно отличающихся по принципам поиска минимаксных решений. Удалось также создать схему не требующую (эвристической) подгонки параметров, каковая наблюдалась ранее во всех публикациях на тему моделирования магнитного поля.

В-третьих, была решена задача о корректном использовании при алгоритмическом моделировании характеристик точности магнитных данных Maximal Deviation Angle и a_{95} , в частности о формулах взаимного их пересчета, которые включены отныне в стандартный пакет обработки данных магнитных измерений.

В четвертых была поставлена и решена задача о корректном статистическом оценивании отклонений реальных данных от глобальной модели магнитного поля, в частности о нестандартной форме гистограмм таких отклонений и об использовании этих гистограмм для оценивания.

Объект исследования

Главными объектами исследования были последовательные официальные пополнения международной базы GEOMAGIA <http://geomagia.gfz-potsdam.de/> палеомагнитных и археомагнитных данных, а также пополнения с учетом измерений, полученных за время выполнения проекта.

Кроме этого были построены и использовались синтетические данные на основе модели GUFM [Jackson et al., 2000] с тем, чтобы получать абсолютные оценки бутстрап-вариаций отдельных модельных реализаций, а также чтобы оценить близость усредненной (в смысле медианного или среднего значения) в каждый момент времени модели и заложенных в синтетические данные расчетных теоретических величин сферических коэффициентов.

Обновленная и исправленная база данных по состоянию на середину 2016 года была объектом для создания окончательной модели (которую, однако, ежегодно придется обновлять с учетом будущих пополнений базы реальных измерений).

Метод

Исследование имело свою собственную специально разработанную теоретико-методическую часть и рутинные вычислительные эксперименты с целью накопления достаточных статистик для численного ответа. Теоретико-методическая часть базируется на следующем очевидном соображении: непрерывность модели во времени является артефактом, поскольку вытекает из применения системы сплайнов, базирующихся на вполне дискретном делении всего промежутка времени на сегменты, поэтому надо исследовать эффекты дискретизации времени отдельно от построения сплайнов.

Для модернизации алгоритма использовались произвольные системы узловых точек, вовсе не обязательно отвечающие равномерному по времени шагу, но учитывающие, например, представительность базы данных на различных временных сегментах. На этом пути выяснилось, что некоторые ранее публикуемые эффекты вариаций магнитного поля Земли были чистыми артефактами малой представительности.

Разделение дискретных и непрерывных эффектов моделирования позволило сравнить модели, полученные поиском экстремума в пространстве разложения гауссовых коэффициентов по кубическим В-сплайнам, и модели, полученные сглаживанием одним кубическим В-сплайном кусочно-постоянных решений на сегментах времени. Заметим, что второй подход значительно уменьшает количество настроечных параметров алгоритма и согласно принципу Оккама является поэтому более надежным. В этом же подходе удалось сравнить различные правила учета возмущений в методе бутстрапа.

В рамках классической математической модели (отвечающей броуновскому процессу с постоянным сносом) для процесса извлечения термоостаточной намагниченности из образца были изучены характеристики точности в терминах угловой меры Maximal Deviation Angle и характеристики угловой меры α_{95} . Статистическая связь этих характеристик была теоретически выведена и независимо проверена методом Монте-Карло, установлена явная зависимость этой связи от параметров, используемых при ре-

альных измерениях (т.е. от числа этапов размагничивания образца и от количества образцов, используемых для оценки a_{95})

Была указана теоретически и проверена на имеющихся реальных данных форма гистограммы отклонений реальных данных от модельных. Соответствующая форма до сих пор эвристически и без объяснений полагалась отвечающей двустороннему распределению Лапласа [Jackson et al., 2000], в реальности же теория рандомизации (смеси) гауссовых величин объясняет широкое семейство возможных форм гистограмм.

Результаты

Выяснилось, что результаты моделирования в голоцене в первую очередь (то есть наиболее сильно) зависят от числа измерений в заданном интервале времени и лишь во вторую – от типа данных, точности реальных данных, применяемого алгоритма и т.д.

Для понимания современного состояния баз архео- и палеомагнитных данных в голоцене приведем график числа измерений в интервалах по 50 лет (рис. 2.5.1.) за последние 3000 лет; более древние образцы настолько малочисленны, что соответствующие интервалы времени должны быть многократно увеличены дабы не оказаться пустыми.

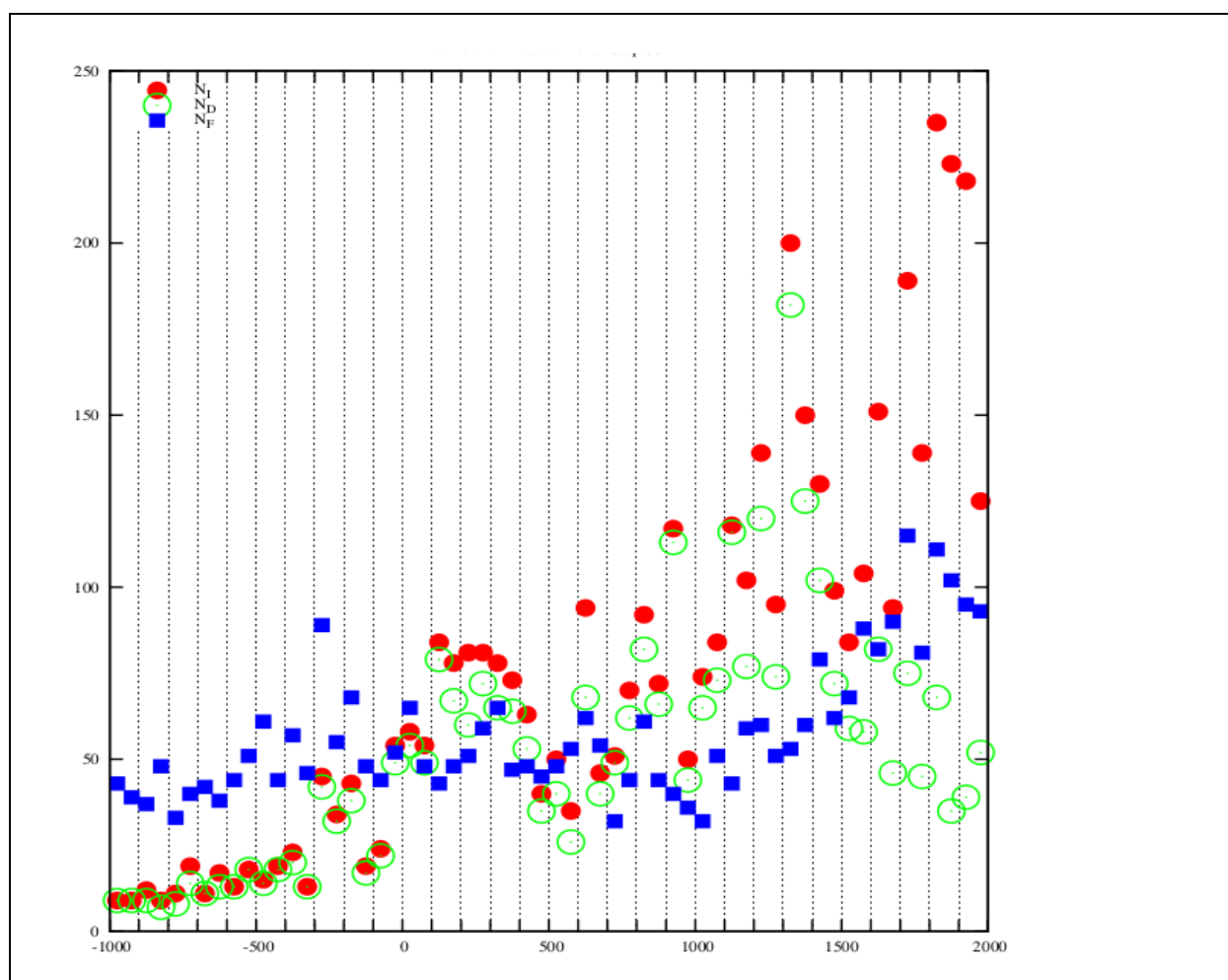


Рисунок 2.5.1. График числа измерений в позднем голоцене наклонений (красные круги), склонений (зеленые окружности) и интенсивностей (синие квадраты) в интервалах времени по 50 лет. По горизонтали указано абсолютное время в годах, по вертикали число измерений в соответствующем интервале (см. также текст выше).

Было установлено (с использованием синтетических данных), что при представительности данных менее 100 результат моделирования в соответствующем интервале времени чрезвычайно нестабилен при необходимых для бутстрапа вариациях и потому для успешного использования метода необходимо использовать лишь те интервалы времени в которых представительность не менее некоторой, достаточно большой величины. Лишь в этом случае неопределенность при вариациях остается в сравнительно разумных пределах и можно говорить о том, что медианное (или, например, среднее) решение демонстрирует сходное с граничными квантильными решениями поведение. Например для интервалов, содержащих по 150 измерений (неважно каких именно), на Рис.2.5.2. для двух типов алгоритмов показаны медианные решения вместе с их 5% и 95% процентными квантилями по возможным вариациям.

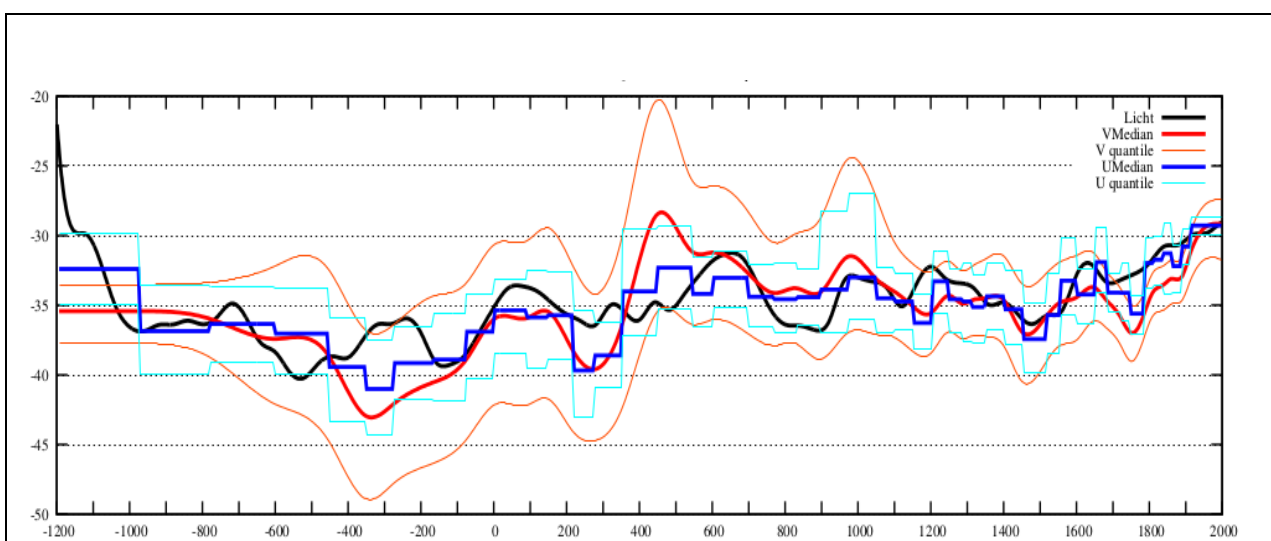
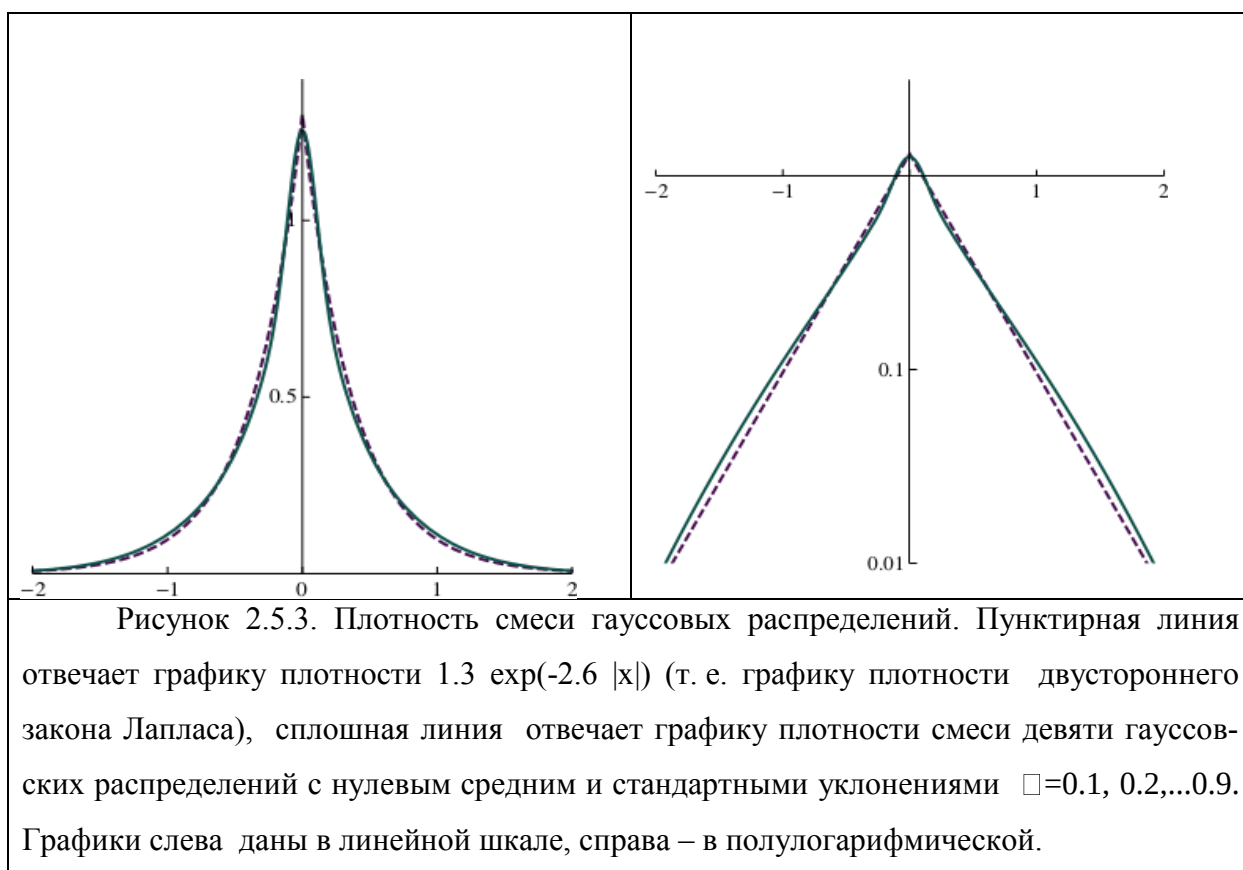


Рисунок 2.5.2. Медианные решения (жирные линии) вместе с их 5% и 95% процентными квантилями (тонкие линии) по возможным вариациям. Красным цветом показаны результаты, отвечающие моделированию в пространстве кубических В-сплайнов, синим – моделирование кусочно-линейных решений, черным – ранее опубликованная сглаженная модель по равномерным сегментам времени. Горизонтальная ось показывает время в годах, вертикальная - значения дипольного коэффициента в микротеслах.

Исследование типов оценок точности в базах данных выявило численные оценки различия двух используемых подходов к вычислению Maximal Deviation Angle, явное соотношение между оценками Maximal Deviation Angle и α_{95} опубликовано и включено в стандартный программный пакет обработки.

Исследование типов отклонений модельных значений магнитного поля от реальных данных показало, что эти отклонения (даже будучи нормализованными на декларируемую в базе данных GEOMAGIA ошибку) не могут считаться выборкой из одного фиксированного гауссова распределения, но представляют из себя смесь выборок из различающихся стандартными отклонениями разных гауссовых распределений. Соответствующая гистограмма действительно похожа на двустороннее распределение Лапласа, этот эффект можно усмотреть на Рис. 2.5.3., где показана плотность смеси всего лишь девяти гауссовых распределений с нулевым средним и стандартными отклонениями $\delta=0.1, 0.2, \dots, 0.9$.



Выводы

1) Современное состояние базы археомагнитных измерений не позволяет сколько-либо точно отследить динамику изменений величины недипольных компонент поля за пределами последних пяти столетий, поскольку возможные артефактные эффекты для

оценки главного дипольного коэффициента имеют порядок 3 мкТ, то есть тот же порядок величины что и вся недипольная компонента поля.

2) Текущие темпы пополнения базы археомагнитных данных таковы, что надеяться на принципиальное увеличение точности динамических археомагнитных моделей голоцена в ближайшее время не приходится.

3) Имеется принципиальная возможность сравнительного количественного анализа точности палеомагнитных данных по осадочным данным и по вулканитам, что дает метод корректного построения моделей на основе данных смешанного типа.

4) Для оценки итоговой точности модели необходимо учитывать наравне с величинами точности самих измерений также и вариации этих величин внутри используемой базы данных, поскольку статистики отклонений измерений от модели не должны проводиться стандартными методами гауссовой статистики.

Блок 3: Изучение эволюции магнитного поля Земли в фанерозое и докембрии.

3.1. Изучение амплитуды вековых вариаций геомагнитного поля на протяжении геологической истории.

Амплитуда вековых вариаций является одной из четырех важнейших характеристик геомагнитного поля, изучение которых может пролить свет на его эволюцию, получить важные ограничения на историю нашей планеты и ее оболочек. В рамках данной части работы были проведены исследования, направленные на получение серии опорных оценок, характеризующих амплитуду геомагнитных вариаций в различные геологические эпохи.

Основные усилия, при этом, были нацелены на изучение вариаций границы перми и триаса и ранней перми. Выбор основных целевых интервалов определялся, как наличием подходящих объектов, так и важностью задач, которые можно было на них решать: знание амплитуды вековых геомагнитных вариаций на границе перми и триаса давало важный инструмент для оценки длительности магматических событий при формировании крупнейшей на планете Сибирской трапповой провинции; характеристика вариаций в ранней перми важна для понимания поведения геомагнитного поля во время каменноугольно-пермского суперхрона – эпохи обратной полярности поля продолжительностью около 50 млн. лет.

Граница перми и триаса: сибирские траппы.

В ходе проведенной работы был выполнен синтез всех палеомагнитных данных, полученных нами ранее при изучении вулканических потоков, слагающих трапповые толщи Норильского региона (разрезы Листвянка, Талнах, Икон, Абагалах, Ергалах, Сундук) и Котуйского региона (разрезы Медвежья, Труба, серия разрезов в долине р. Маймечи).

Вековые геомагнитные вариации оцениваются обычно по угловому разбросу S_b виртуальных палеомагнитных полюсов, полученных по каждому единичному определению (сайту). При этом, предполагается, что последнее отражает некоторое мгновенное (в рассматриваемых масштабах времени) состояние геомагнитного поля.

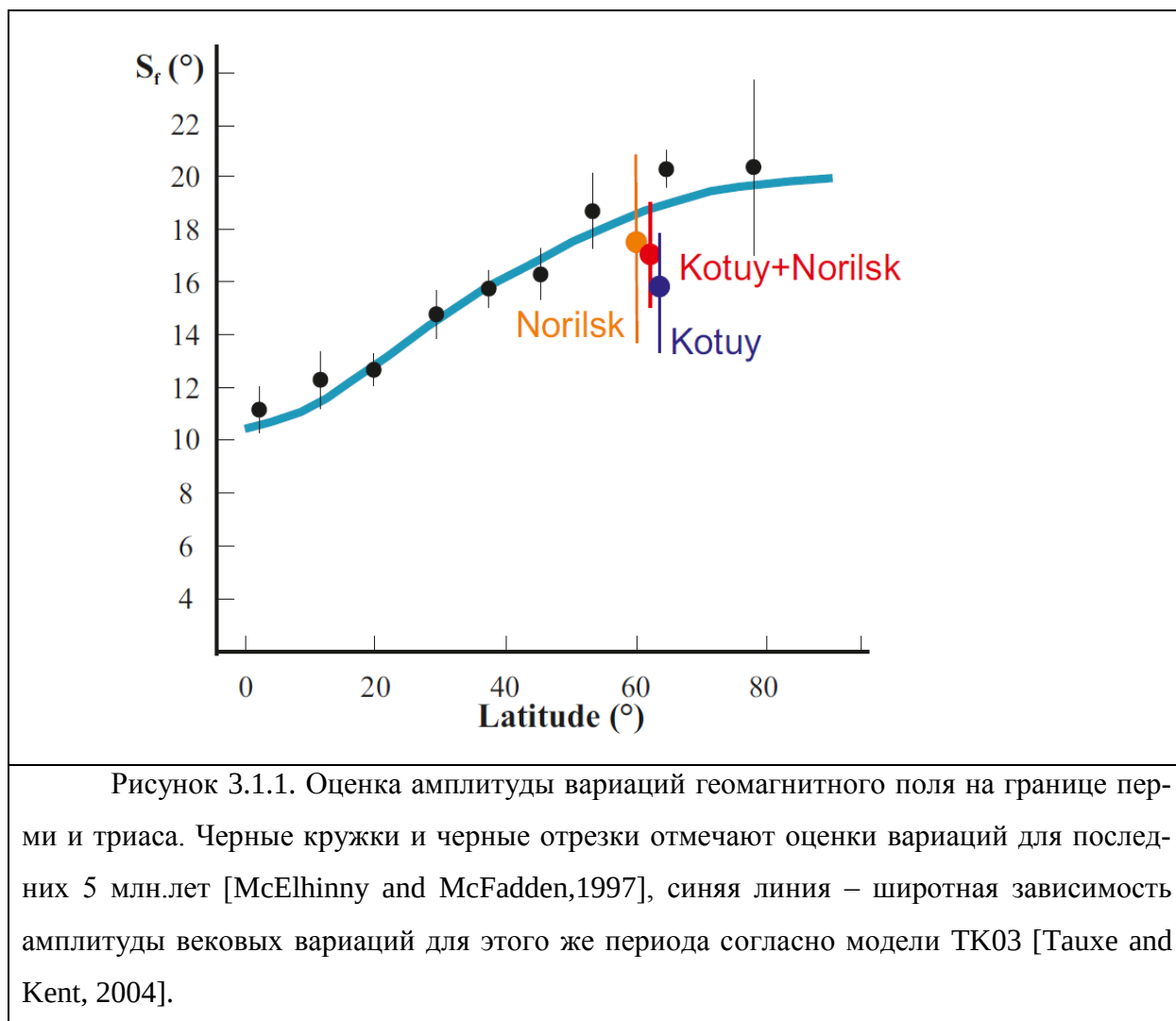
$s_B = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\Delta_i^2 - \frac{s_{w_i}^2}{n_i} \right) \right]^{1/2}$	,	$s_{w_i} = 81\sqrt{K}$ $K = k \left(\frac{1}{8} (5 + 18 \sin^2 \lambda + 9 \sin^4 \lambda) \right)^{-1}$
$(i = 1, \dots, N)$		
Расчет амплитуды вековых геомагнитных вариаций. Δ_i – угловое расстояние i-го индивидуального виртуального полюса от среднего, s_{w_i} – внутрисайтовый разброс виртуальных полюсов, N – число сайтов (потоков, групп потоков), n_i – число образцов, взятых с сайта, k – кучность палеомагнитных направлений внутри сайта, λ – палеоширота сайта [Biggin et al., 2008].		

При расчете вековых вариаций для отсечения выбросов, а также направлений, связанных с экскурсами и инверсиями обычно использовался критический угол (cut-off), рассчитываемый по методу Ван-Дамма [Vandamme, 1994].

Излияние вулканических потоков обычно неравномерно распределено во времени, поэтому, если расчет вариаций ведется по палеомагнитным направлениям, полученным по каждому потоку, конечная оценка может быть смещенной. Во избежание этого, для расчета вариаций мы использовали виртуальные полюсы, полученные по дирекционным группам, каждая из которых отражала условно мгновенное состояние геомагнитного поля. Идентификация групп проводилась по методу [Chenet et al., 2008].

В результате, по данным, полученным по более, чем по 150 вулканическим потокам, нами была выполнена оценка амплитуды вековых геомагнитных вариаций по всем изученным разрезам вместе (17.0° (95% доверительный интервал -15.0° - 19.0°)),

--



а также по норильскому (17.4° (95% доверительный интервал -13.7° - 20.8°)) и котуйскому регионам (15.7° (95% доверительный интервал -13.3° - 17.8°)) отдельно (см. рис. 3.1.1.).

Как видно на рис. 3.1.1., амплитуда вариаций, рассчитанных по всем изученным объектам, хорошо соответствует данным, описывающим вековые геомагнитные вариации за последние 5 млн. лет. Таким образом, наш результат указывает на то, что вариации геомагнитного поля на границе палеозоя и мезозоя были того же масштаба, что и в течение последних 5 млн. лет

Геологическое приложение результатов проведенных исследований

Данные об амплитуде вековых вариаций геомагнитного поля на границе перми и триаса возможно использовать для оценки длительности и темпов магматизма при формировании сибирских траппов. Для этого нами были проведены исследования на юге и северо-востоке Сибирской трапповой магматической провинции. Эти работы показали, что разброс палеомагнитных направлений в интрузиях на расстояниях от нескольких десятков до 200 км

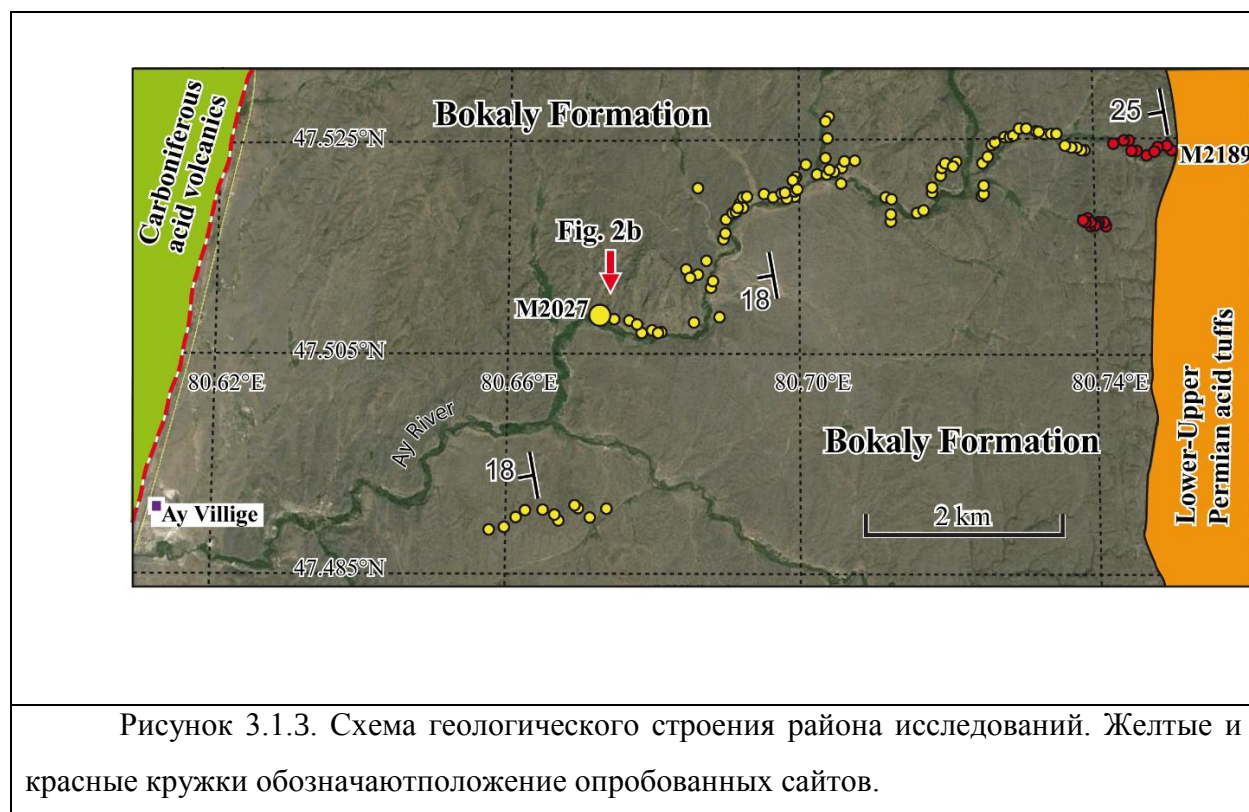
очень мал и эти направления образуют на стереограмме тесные кластеры (Рис. 3.1.2.а). Одновременно было показано, что разброс палеомагнитных данных, не попадающих в кластеры, в несколько раз больше (Рис. 3.1.2.б.). Исходя из этих данных был сделан вывод, что сильное рассеяние данных во втором случае обусловлено вековыми вариациями, тогда как кластеры - следствие почти одномоментного (2-3 тысячи лет, что несоизмеримо с обычным геологическим масштабом времени) формирования интрузий, а объемы магмы, внедрившейся в течение одного импульса магматизма, составляют сотни и тысячи кубических километров. Расчеты показали, что внедрение и последующее остывание мощных интрузивных полей, отвечающих одному кластеру, не превышало 2-3 тыс. лет.



Раннепермские базальты и риолиты Северо-Восточного Казахстана и раннекаменноугольные вулканические комплексы Южного Урала.

Как уже отмечалось выше, одним из наиболее надежных способов получить информацию о характеристиках древнего геомагнитного поля является палеомагнитное изучение мощных лавовых толщ. Однако на сегодня, возраст объектов, по которым получены такие данные, чаще всего менее 5 млн. лет, их гораздо меньше для остальной части кайнозоя и всего мезозоя, есть два полноценных результата по докембрийским породам, но их практически

не существует для палеозоя. С целью получить первые оценки характеристик геомагнитного поля в эту эру нами была изучена коллекция пермских базальтов из мощной лавовой толщи (бокалинская свита) на северо-востоке Казахстана (Рис. 3.1.3.). Проведенные геохронологические исследования (уран-свинцовый метод с помощью лазерной абляции первично магматических цирконов) позволили установить, что базальтовая толща имеет раннепермский возраст (286 ± 3 млн. лет).



Всего было изучено около 700 образцов из 125 потоков (сайтов) из разреза мощностью около 1600 м; в 88 сайтах с помощью ступенчатой температурной чистки с хорошей точностью была выделена характеристическая компонента обратной полярности. Эта компонента имеет доскладчатый возраст, и, вероятнее всего, первична.

Все эти направления имеют обратную полярность и тесно сгруппированы; также надо обратить внимание, что в этой совокупности нет ни одного вектора с аномальным направлением, которое можно было бы связать с палеомагнитными экскурсами или переходными зонами (Рис. 3.1.4.а). Средний палеомагнитный полюс изученной толщи располагается вблизи последовательности эталонных направлений, полученных пересчетом кривой миграции палеомагнитного полюса Балтики в район исследований. Наилучшее согласие отмечается для эталонных данных с возрастами 270 и 280 млн. лет (Рис. 3.1.4.б), что хорошо согласуется с вышеприведенным абсолютным возрастом толщи. Столь хорошее совпадение наблюдаемых

и эталонных палеомагнитных направлений позволяет сделать вывод об очень высокой степени дипольности геомагнитного поля в ранней перми, что согласуется с ранее сделанным выводом для поздней перми [Bazhenov, Shatsillo, 2010].

На следующем этапе исследования были сопоставлены наиболее надежные палеомагнитные данные по мощным лавовым толщам разного возраста, для которых возможно оценить характеристики древнего геомагнитного поля с приемлемой достоверностью. Используемые для анализа данные имеют возраст более пяти миллионов лет (от 12 до 1100 млн. лет) и получены в разных частях Земли. Таких результатов сравнительно мало; и, после выбраковки ненадежных данных, удалось найти только 22 совокупности, пригодных для анализа (Рис. 3.1.5.).

Разброс значений кучности палеомагнитных направлений k велик и позволяет сделать только очень осторожные выводы (Рис. 3.1.5.a). Во-первых, разброс самых хорошо определенных значений (число направлений более 50) несколько меньше, чем для хуже определенных (число направлений более 50).

Во-вторых - намечается некоторый рост величины кучности (= увеличение степени группирования данных) от палеошироты, но определить точнее вид этой зависимости не представляется возможным. В-третьих - и это наиболее достоверный вывод! - все данные ложатся выше теоретической кривой для наиболее популярной сейчас модели вековых вариаций геомагнитного поля [Tauxe and Kent, 2004], причем для подавляющего большинства случаев различие между предсказанными теорией и наблюдаемыми значениями статистически значимо.

Разброс точек на графике зависимости стандартного углового отклонения палеомагнитных направлений s от палеошироты для тех же данных гораздо меньше (Рис. 3.1.5.б).

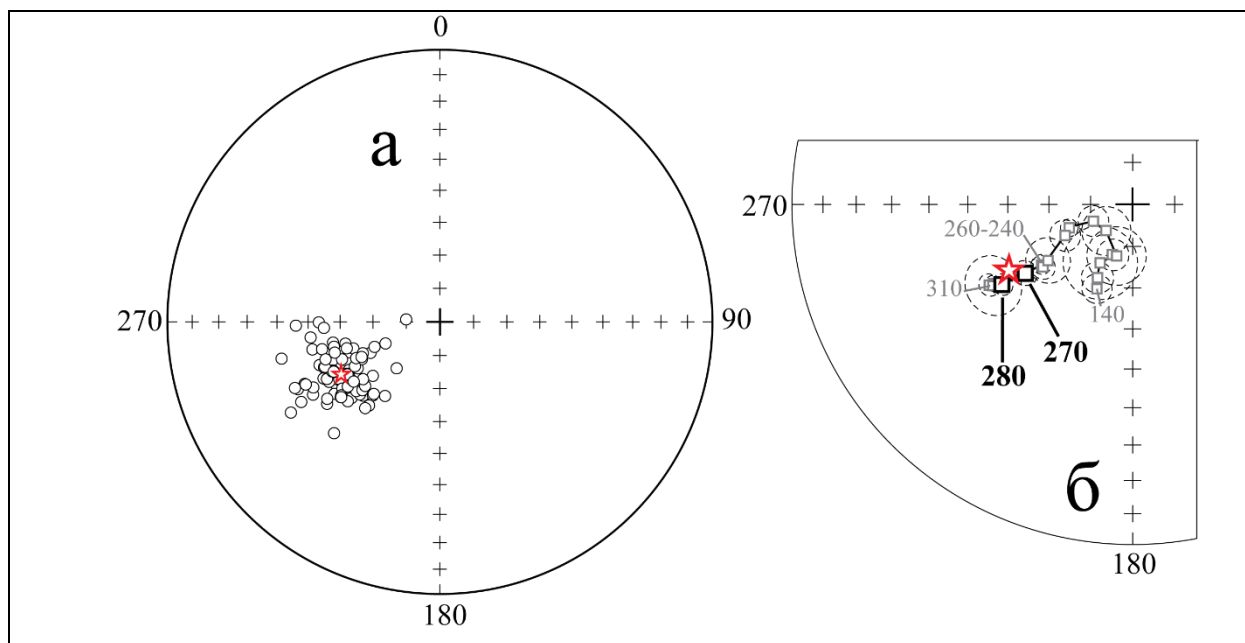


Рисунок 3.1.4. (а) Стереограмма средних по сайтам направлений высокотемпературной компоненты намагниченности в вулканитах бокалинской свиты (древняя система координат); для ясности, круги доверия для этих данных не показаны. Красной звездочкой обозначено общее среднее по коллекции (круг доверия для этого результата меньше размеров символа). (б) Сравнение полученного среднего направления с эталонными палеомагнитными направлениями для Балтики (квадраты) [Torsvik et al, 2012] с их кругами доверия (тонкие пунктирные линии). Эталонные направления с возрастами 270 и 280 млн. лет показаны большими значками. Все данные спроектированы на верхнюю полусферу.

Однако надо учесть, что эти два параметра связаны простой зависимостью ($s = 81k^{-0.5}$). Таким образом, происходит просто искусственная регуляризация: разброс точек на графике уменьшается, зато исчезают даже намеки на зависимость этой характеристики от палеошироты. Правда, различие между предсказанными теорией и наблюдаемыми значениями устойчиво сохраняется.

Наконец, третий часто употребляемый геомагнитный параметр - удлинение E (степень удлинения) распределения единичных палеомагнитных направлений [Tauxe and Kent, 2004]. Здесь разброс настолько велик и бессистемен, что констатация данного факта - единственный кажущийся разумным вывод (Рис. 3.1.5.в).

Однако на использовании зависимости параметра E от широты в предположении, что на всем протяжении истории Земли была верна модель вековых вариаций геомагнитного поля [Tauxe and Kent, 2004], основан метод EI (elongation-inclination) определения степени занижения наклонов для определения «правильных» палеоширот. Этот метод ши-

роко используется в последние годы, несмотря даже на то, что его автор [Таухе, 2005] говорила об обоснованности применения этого подхода только для коллекций из много более чем 100 сайтов. На практике же нередки случаи «успешного» применения метода ЕІ для коллекций всего из 20-30 сайтов. Но и без этого проведенный в данном исследовании анализ показывает, что параметр Е для реальных коллекций из 50 и более единичных направлений (красные символы на Рис. 2-3в) не «слушается» теории, а систематические отклонения наблюдаемых значений других параметров от предсказаний модели (Рис. 3.1.5.а-б) говорят о ее несовершенстве.

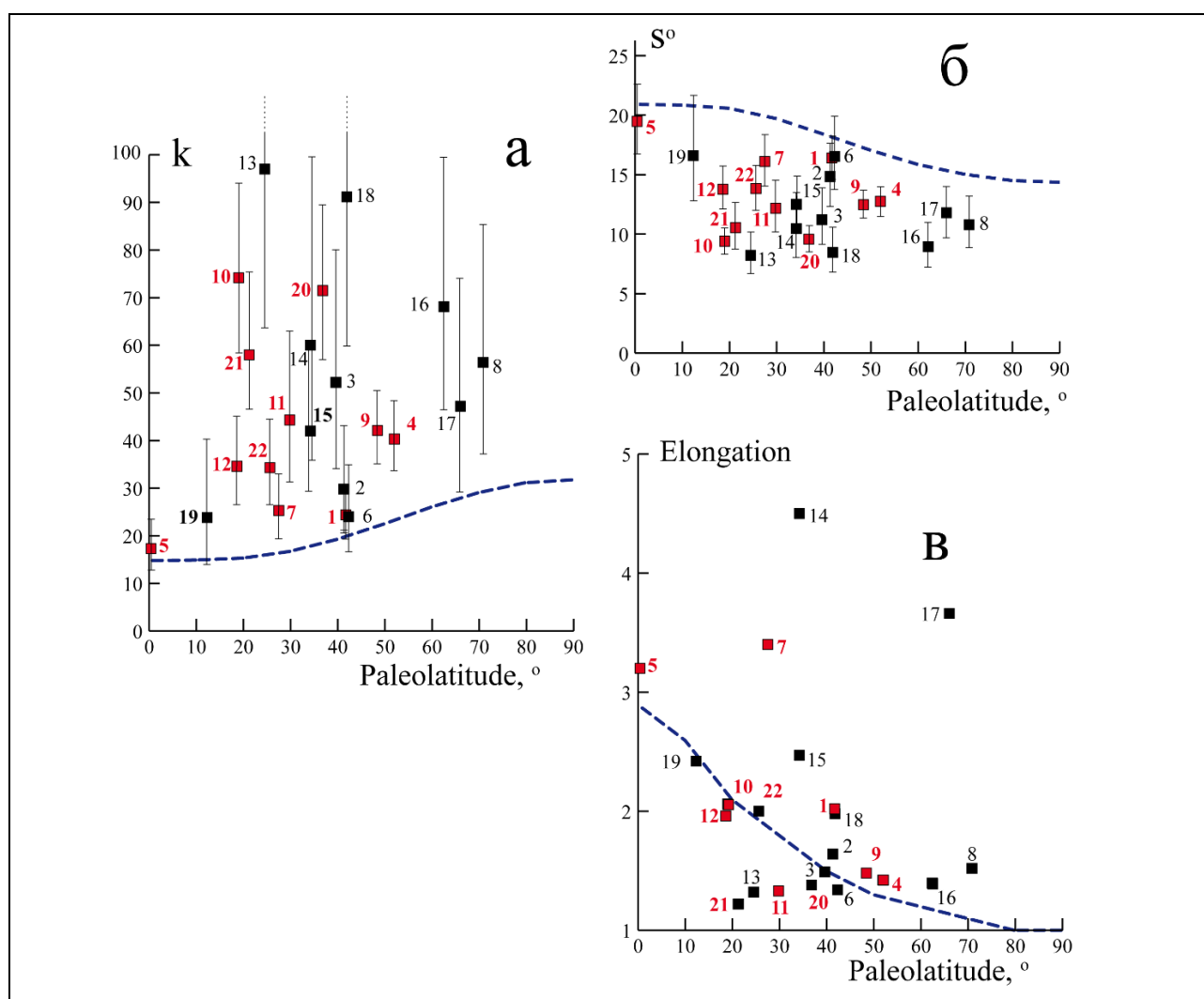


Рисунок 3.1.5. (а) График зависимости кучности палеомагнитных направлений k от палеошироты для различных коллекций с возрастaми от 12 до 1100 млн. лет; всего использовано 22 совокупности данных. Красные (черные) символы обозначают значения, основанные на > 50 (< 50) единичных направлений (средних векторов по сайтам). Тонкие вертикальные линии - 95% доверительные интервалы. Толстая пунктирная линия - теоретическая зависимость для наиболее популярной сейчас модели вековых вариаций геомагнитно-

го поля [Tauxe and Kent, 2004]. (б) График зависимости стандартного углового отклонения палеомагнитных направлений s от палеошироты для тех же данных при тех же обозначениях. (с) График зависимости удлинения распределений палеомагнитных направлений E от палеошироты для тех же данных при тех же обозначениях.

В ходе выполненных работ была отобрана коллекция, включающая более чем 400 образцов (около 40 сайтов из коренных базальтов и туфов плюс гальки тех же пород из линз внутриформационных конгломератов) из раннекарбонового (турнейский и ранневизейский ярусы) вулканического комплекса Богдановского грабена в восточной части Южного Урала. Лабораторные исследования, в первую очередь детальная термочистка коллекции, в настоящее время выполняется в палеомагнитной лаборатории ГИН РАН. На момент написания отчета обработана и проанализирована большая часть коллекции, что позволяет сделать уже некоторые предварительные выводы:

1) в породах присутствует высокотемпературная характеристическая намагниченность прямой и обратной полярности;

2) направления этой компоненты хорошо сгруппированы внутри отдельных сайтов, но сильно рассеяны между сайтами;

2) во многих образцах также выделяется среднетемпературная компонента обратной полярности, направление которой хорошо согласуется с пермскими эталонными направлениями для Русской платформы.

Лабораторное изучение этой коллекции и анализ полученных данных будут завершены в 2017 г.

Геологические приложения результатов проведенных исследований.

А. Огромная территория (около 1000000 км²) Казахстана занята вулканическими поясами, более древним Девонским (середина раннего – начало позднего девона) и более молодым Балхаш-Илийским (середина раннего карбона – пермь); оба пояса имеют надсубдукционное происхождение. На оба пояса несогласно наложен ряд впадин, заполненных континентальными осадками и субаэральными вулканическими толщами иного состава и генезиса. Если возраст пород Девонского пояса еще как-то ограничен отдельными горизонтами с морской фауной, то датировки и расчленение более молодых вулканических серий основаны на редких находках флоры и крайне неоднозначных сопоставлениях. Изученная толща вулканитов бакалинской свиты является самым верхним членом разреза наложенных впадин и имеет позднепермский возраст, определенный по флоре и пресноводным моллюскам. Исходя из

этих данных, традиционно полагалось, что магматизм в регионе захватывал большую часть перми.

В изученном разрезе бакалинской свиты общей мощностью более двух километров преобладают базальты и андезито-базальты, среди которых изредка встречаются потоки более кислых пород (дациты). Из мощного потока дацитов в средней части разреза был отобран образец, из которого в лаборатории ГИН РАН были успешно выделены многочисленные хорошо ограненные первично магматические кристаллы циркона. Методом лазерной абляции по этим зернам в геохронологической лаборатории Университета Флориды (США) была получена датировка 286.3 ± 3.5 млн. лет. Следовательно, позднепалеозойский магматизм в Казахстане завершился в артинское время, т.е. на 20 млн. лет ранее, чем предполагалось. Соответственно, требуется глубокая ревизия наших взглядов на тектоническую эволюцию западной части Центрально-Азиатского орогенного пояса.

Б. Как уже обсуждалось выше, среднее направление первичной намагниченности бакалинской свиты практически совпадает с эталонными направлениям Восточно-Европейской платформы с возрастом 280 млн. лет (Рис. 3.1.4.б), что согласуется с полученным в данной работе возрастом изученных лав. Выше также сделан вывод, что степень дипольности геомагнитного поля в ранней перми была очень высокой. Но это же согласие наблюдаемых и эталонных (= предсказанных) палеомагнитных данных свидетельствует о том, что Казахстан (как минимум, его большая часть, расположенная западнее района исследований) и Восточно-Европейская платформа не двигались относительно друг друга. С учетом погрешностей использованных данных, относительные перемещения этих двух блоков после середины ранней перми составляли: вращение $-3.6^\circ \pm 4.2^\circ$, сближение вдоль древнего меридиана $-3.1^\circ \pm 2.4^\circ$. Величина поворота находится в пределах погрешности. Величина сближения статистически значима, но настолько мала, что подобное различия могут возникнуть по целому ряду причин, не имеющих отношения к горизонтальным перемещениям.

В течение перми тектоническая активность проявлялась на всей огромной территории между районом наших исследований и жесткой Восточно-Европейской платформой. На большей части Казахстана эта активность проявлена внедрением многочисленных гранитных интрузий; собственно, деформации выражены пологими складками, которые присутствуют лишь местами, а связанное с ними сокращение могло составить первые проценты. Иная ситуация в складчатом поясе Урала, где в пермское время формировались серии складок и надвигов; например, все деформации в западных зонах Урала имеют кунгурский возраст, т.е. примерно на 10 млн. лет позже накопления изученных лавовых толщ. Наши палеомагнитные данные, таким образом, показывают, что деформации, приведшие к формированию поздне-

палеозойского пояса Уралид, происходили без заметного тектонического сближения этого пояса со структурами Казахстана.

Основные выводы:

1. Показано, что амплитуда вековых геомагнитных вариаций на рубеже палеозоя и мезозоя была примерно того же уровня, что и последние 5 млн. лет;
2. Палеомагнитные исследования мощной раннепермской лавовой толщи показывают высокую степень дипольности геомагнитного поля, а также то, что вековые вариации в поздней перми были намного слабее, чем в мезозое и кайнозое, а само геомагнитное поле было менее возмущенным.
3. Глобальный анализ разновозрастных данных по мощным лавовым толщам показывает, что при совместном рассмотрении всех имеющихся фанерозойских и протерозойских данных амплитуды вековых вариаций несовместимы ни с одной из ранее предлагавшихся моделей.
4. Данные, полученные при изучении записи вековых геомагнитных вариаций в интрузивных комплексах сибирских траппов, позволяют сделать следующие заключения: интрузивный магматизм в разных частях Сибирской БМП происходил в виде однократных импульсов; продолжительность отдельных импульсов не превышала 2-3 тыс. лет; с помощью палеомагнитных данных возможно определить длительность событий, в тысячи раз более коротких, чем точность изотопных методов датирования.
5. Полученная датировка бакалинской лавовой толщи более чем на 20 млн. лет древнее предшествующих данных, что требует пересмотра взглядов на эволюцию магматизма в западной части Центрально-Азиатского орогенного пояса. Наконец, очень хорошее согласие среднего направления первичной намагниченности в лавовой толще Восточного Казахстана с эталонным направлением Восточно-Европейской платформы указывает на то, что формирование складчатого пояса Уралид происходило без заметного сближения структур Казахстана с этой платформой.

3.2. Напряженность геомагнитного поля на протяжении геологической истории

Напряженность геомагнитного поля и характер его вековых вариаций на протяжении геологической истории составляют ключевые ограничения при моделировании динамо, и, таким образом, критически важны для понимания явлений, протекающих в ядре Земли. Имеются серьезные основания полагать, что формирование и рост внутреннего ядра, изменения физических условий на границе ядра и нижней мантии с необходимостью должны влиять на работу геодинамо через изменение характера конвекции в жидком ядре и, соответственно, на изменение напряженности геомагнитного поля. Следовательно, получение надежной и подробной записи изменений напряженности геомагнитного поля для всей земной истории, или для значительной ее части, имеет принципиальное значение для расшифровки геодинамической эволюции нашей планеты. Несмотря на исключительную важность проблемы и более чем полувековую историю исследований, число надежных определений продолжает оставаться далеко недостаточным для того, чтобы делать уверенные выводы о характере долговременных (в масштабах геологического времени) вариаций напряженности геомагнитного поля. В первую очередь это объясняется крайней трудоемкостью получения надежного результата, ограниченным числом объектов, благоприятных для определения палеонапряженности и быстрым убыванием их числа при движении вглубь геологического времени. Ограниченность числа надежных (особенно, докайнозойских) данных приводит к тому, что среди специалистов до сих пор не достигнуто согласованное мнение относительно генеральных, самых общих характеристик поведения напряженности геомагнитного поля на протяжении истории нашей планеты. К настоящему времени предложено несколько гипотез, описывающий характер долговременных вариаций напряженности в течение геологической истории, но ни одна из них не является в достаточной мере убедительной.

Цели. Из сказанного вытекают следующие цели настоящего исследования:

Получение новых достоверных определений величины палеополя в геологическом прошлом и корректное описание характера эволюционных изменений напряженности геомагнитного поля на протяжении геологической истории.

Задача 1. Особый интерес для исследований палеонапряженности в фанерозое представляет девон. Впервые проблема девонского поля была обозначена в работе [Creer and Emberton 1967] по результатам изучения нижнедевонских пород Шотландии, где были выделены два различных палеополюса DI и DII. Последующие исследования пород девонского воз-

раста в разных регионах земного шара подтвердили существование целого ряда существенно различающихся полюсов в девоне, что не укладывается в рамки стандартного поведения стабильного дипольного поля (см. например, [Smethurst & Khramov 1992; Torsvik 1985; Veselovskiy & Arzamastsev 2011; Bazhenov et al., 2013]).

Имея в виду проблемы в описании направления девонского поля, было бы крайне интересно проанализировать данные по палеонапряжённости B_{anc} в этот период. Однако, в мировых базах данных (МБД) www.brk.adm.yar.ru/palmag/database_e.html; <http://earth.liv.ac.uk/IAGA/>) по этой проблеме представлено всего 7 статей и ни одна из них не удовлетворяют современным критериям надёжности. Исходя из этого, в 2016 году нами решалась задача получения новых достоверных определений величины палеополя в девоне и их интерпретация в совокупности с данными по B_{anc} по другим геологическим периодам.

Объект. Для решения этой задачи нами подробно исследовались коллекции пород девонского возраста, отобранные из разрезов двух географически разнесенных регионов: Минусинской впадины (Сибирь) и Кольского полуострова.

Метод. Определения палеонапряжённости проводились традиционными методами Телье-Коэ (с процедурой чек-точек) (ТТ) и Вилсона (WL), к которым был добавлен ещё микроволновый метод Шоу (MW).

Результаты. Кольская девонская провинция включает в себя многочисленные системы даек и крупных интрузий, таких как Хибины и массив Ловозеро. Согласно изотопным определениям возраста (Ar/Ar и Rb-Sr методы) [Veselovskiy et al. 2013], магматическая активность на Кольском полуострове происходила в девоне в период 390-360 млн. лет. Электронно-микроскопические исследования показали присутствие в образцах крупных титаномагнетитовых зёрен, обнаруживающих типичную структуру магнетит-ильменитового распада как результат высокотемпературного окисления.

Вектор NRM у большинства образцов обнаруживает две или даже три компоненты. Оценка древнего поля проводилась по высокотемпературной компоненте, которая выделяется в достаточно широком температурном интервале. Всего получено 29 удовлетворительных оценок B_{anc} методами Телье и Шоу и 17 – методом Вилсона.

После ревизии и строгой селекции данных по минусинской коллекции в окончательную сводку вошли 39 надёжных определений B_{anc} , полученных на четырёх сайтах (green component в таб. 3.2.1.). Образцы, помеченные в этой таблице как yellow и red components отвечают сайтам, девонский возраст образования NRM которых подвергается сомнению, поэтому в окончательной сводке данных (рис. 3.2.1. и рис. 3.2.2.) они не присутствуют.

Результаты определения палеонапряжённости для минусинской и кольской коллекций представлены в Табл. 3.2.1.

Отметим, прежде всего, что значения палеонапряжённости, полученные на породах Кольского полуострова, вполне согласуются с данными по сибирской коллекции из Минусинской впадины (таб. 3.2.1.), что позволяет сформулировать выводы, основанные на общем блоке данных по обеим коллекциям.

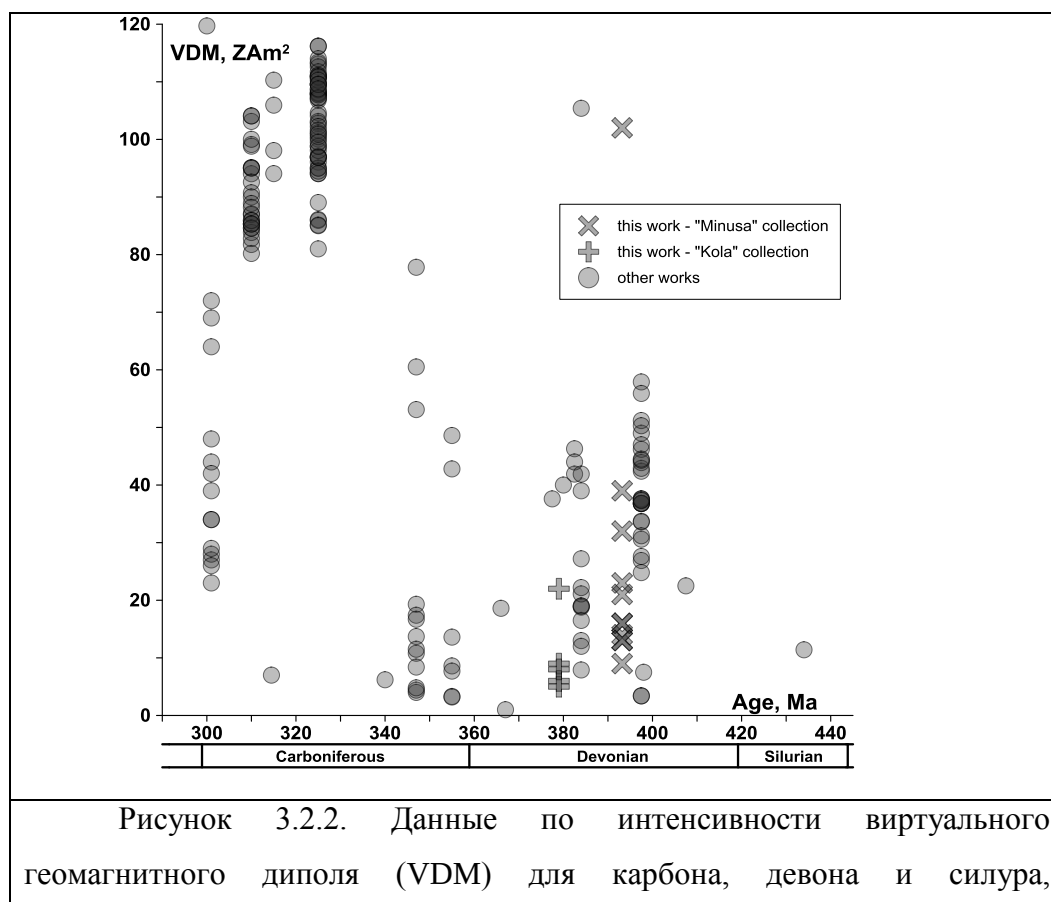
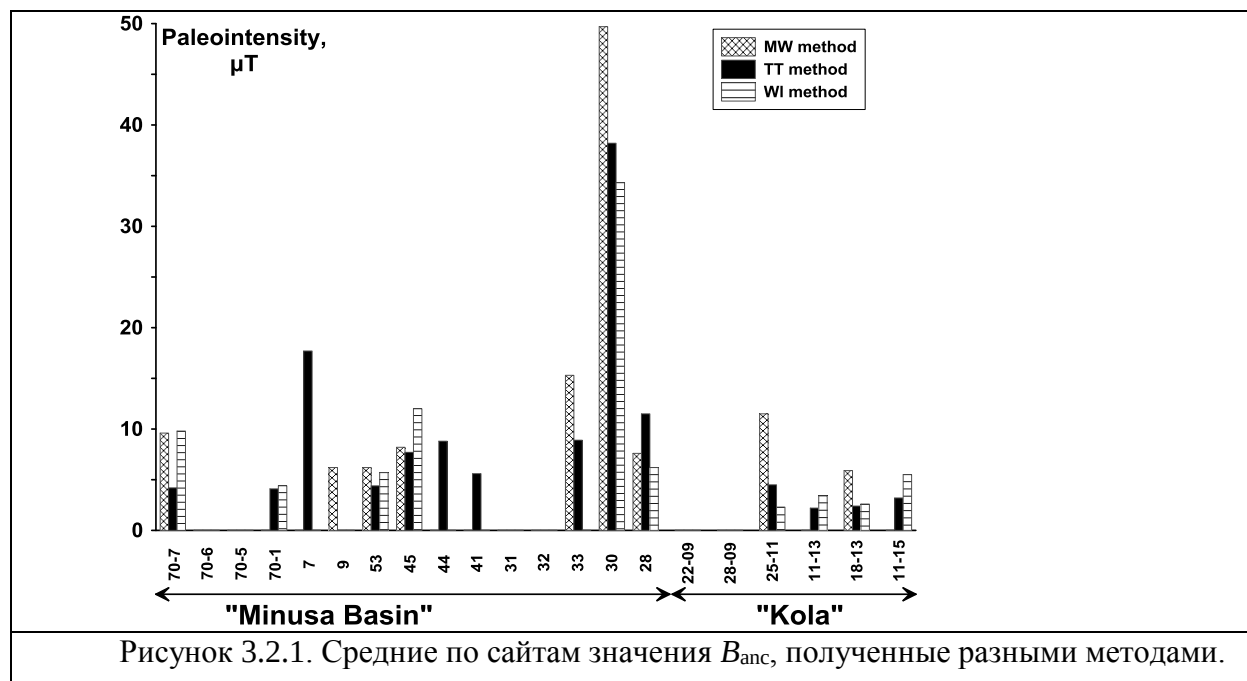
Из сравнения средних по сайтам значений B_{anc} , полученных тремя разными методами, видно, что, за единичными исключениями, они находятся в хорошем согласии между собой (рис. 3.2.1.), что увеличивает надёжность представленных здесь определений.

Средние по сайту величины B_{anc} для различных методов (TT, MW, WL).

Location	Site	MW method		TT method		WL's method	
		N'	B' _{anc} (μT)	N	B _{anc} (μT)	N''	B'' _{anc} (μT)
Part 1 – collection «Minusa»							
<i>Sites with green components of NRM</i>							
Koksa-N	70-7	2	9.6	1	4.2	1	9.8
Koksa-N	70-5	-	-	-	-	-	-
Koksa-N	70-1	-	-	1	4.1	1	4.4
Sisim Immirskaya suite	45	1	8.2	6	7.7	3	12.0
Truba	31	-	-	-	-	-	-
Truba	32	-	-	-	-	-	-
Truba	33	2	15.3	1	8.9	-	-
<i>Sites with yellow components of NRM</i>							
Koksa-S	007	-	-	1	17.7	-	-
Koksa-S	009	2	6.2	-	-	-	-
Tuba	30	1	49.7	3	38.2	3	34.3
Tuba	28	2	7.6	1	11.5	8	6.2
<i>Sites with red components of NRM</i>							
Koksa-N	70-6	-	-	-	-	-	-
Sisim Immirskaya suite	53	1	6.2	4	4.4	3	5.7
Sisim Immirskaya suite	44	-	-	4	8.8	-	-
Sisim Immirskaya suite	41	-	-	6	5.6	-	-
Part 2 – collection «Kola»							
Kola	22-09	-	-	-	-	-	-
Kola	28-09	-	-	-	-	-	-
Kola	25-11	2	11.5	1	4.5	1	2.3
Kola	11-13	-	-	3	2.2	2	3.4
Kola	18-13	1	5.9	1	2.4	4	2.6
Kola	11-15	-	-	6	3.2	8	5.5

Таблица 3.2.1.

Как видно из рис. 3.2.1., основной массив данных (за исключением одного сайта Минусинской впадины) указывает на низкую (10-17 мкТ) и крайне низкую (2-10 мкТ) величину палеонапряжённости в девоне. Рассчитанные значения VDM составляют, соответственно, (30-50)Z и (2-30)Z в сравнении с VDM =78Z, характерным для настоящего времени ($Z = 10^{21}$ Ам²).



Любопытно, что полученные данные в целом согласуются с уже опубликованными результатами других авторов по B_{anc} (рис. 2) по среднему и нижнему девону, хотя, как уже отмечалось выше, они не полностью удовлетворяют современным критериям, причём большинство из них выполнено не по методике Телье.

Переходя к интерпретации данных, отметим, что результаты, полученные как нами и другими авторами как по палеонаправлениям, так и по палеонапряжённости, говорят о сложном характере поведения магнитного поля Земли в девоне. Во-первых, здесь имеются многочисленные свидетельства о значимо различающихся палеомагнитных направлениях, существование которых трудно объяснить перемагничиванием или влиянием локальной тектоники. Во-вторых, мы видим низкие и аномально низкие величины палеонапряжённости на большинстве изученных нами объектов. В совокупности это приводит к мысли о существенной специфике поведения геомагнитного поля в этот период, характеризующейся слабой дипольной составляющей, сравнимой по величине с интенсивностью гармоник высшего порядка. Как следствие, в некоторые интервалы времени (в особенности это относится к среднему и позднему девону) поле могло вообще иметь мультипольную геометрию, провоцирующую наступление частых экскурсов и инверсий.

Возвращаясь теперь к поставленной задаче описания эволюционных изменений напряженности геомагнитного поля на протяжении геологической истории, отметим следующие ключевые наблюдения. Согласно моделям тепловой эволюции Земли, твёрдое ядро в ней могло появиться не раньше начала протерозоя [Aubert et al., 2009], а скорее, в его конце. Предполагалось, что его появление можно увидеть по палеомагнитным данным, поскольку при отсутствии внутреннего ядра эффективность генерации геомагнитного поля относительно невелика, что влечёт за собой доминирование низких значений VDM. Действительно, ранее нами по палеопротерозойским породам Южной Африки были выполнены определения напряженности геомагнитного поля времени образования этих пород (1.85 млрд. лет назад) и было показано, что в это время средняя величина напряженности поля была почти втрое меньше его средней величины в кайнозое. Это обстоятельство, в совокупности с другими литературными данными по палеонапряжённости и частоте инверсий в протерозое, могло бы рассматриваться как подтверждение гипотезы о позднем возникновении твёрдого внутреннего ядра Земли.

С другой стороны, имеющиеся в МБД данные о величине палеонапряжённости в позднем и среднем архее, удовлетворяющие современным требованиям надёжности, указывают на существование в это время сильного геомагнитного поля порядка его современного

значения [Tarduno et al., 2006]. Отсюда следует, что напряженность геомагнитного поля в докембрии изменялась немонотонно и, стало быть, в настоящее время, эволюция этого параметра не может быть напрямую связана с возникновением и ростом внутреннего ядра Земли.

Выводы

1. Анализ данных по напряженности геомагнитного поля говорит в пользу гипотезы о неоднократной смене эпох высокого и низкого поля на протяжении геологической истории Земли. При этом поле обязательно будет иметь дипольную геометрию. Последние расчёты геодинамических моделей [Driscoll, 2016] согласуются с этим утверждением. При этом (имея в виду данные по девону), надо принять, что и в фанерозое режим геодинамо мог быть непостоянным.

2. Если гипотеза о перемежаемости процесса генерации геомагнитного поля справедлива, то это, в свою очередь, поднимает вопросы как о режиме работы геодинамо, так и о форме магнитосферы и об экологической обстановке в период слабого магнитного поля, поскольку слабое магнитное поле и наличие мультипольных полюсов с неизбежностью приведут к резко возросшей активизации магнитосферных и ионосферных процессов с последующим влиянием на радиационную обстановку и климат планеты.

Очевидно, для ответов на эти вопросы необходимы новые надёжные данные как по направлениям, так и по палеонапряжённости девонского поля.

Задача 2. Определение напряженности геомагнитного поля 1.8 - 1.5 миллиарда лет назад

Ранняя история геомагнитного поля к настоящему времени изучена очень слабо. На весь докембрий, который занимает почти 90% истории Земли, имеется всего около 240 определений палеонапряженности ($H_{др}$) геомагнитного поля (это ~5% всех существующих определений). Из них только 63 удовлетворяют минимальным критериям надежности - использован метод Телье; для определения использовалось не менее трех образцов; стандартная ошибка определения не более 15%. С целью увеличения числа таких данных, нами выполнены определения $H_{др}$ по палеопротерозойским породам из магматического комплекса Бушвелд в восточной части Каапваальского кратона в Южной Африке. Для пород основных сайтов имеются абсолютные определения возраста. Всего было отобрано 431 ориентированный образец из 27 долеритовых даек на 17 сайтах возрастом 2.9, 2.7 и 1.85 млрд. лет [Lubnina et al., 2010].

Объекты. На образцах из 10 даек различного возраста проведен комплекс экспериментов по исследованию их магнитных свойств и определению палеонапряженности. Температуры Кюри и устойчивость магнитных минералов к нагревам оценивались по сериям тем-

пературных кривых намагниченности насыщения M_{si} снимавшихся при последовательных нагревах образцов до возрастающих температур T_i в магнитном поле $H = 450$ мТл (Рис. 3.2.3.).

Для оценки магнитной жесткости и доменной структуры ферромагнитных зёрен – носителей природной остаточной намагниченности NRM – измерялись параметры петли гистерезиса: коэрцитивная сила H_c , остаточная коэрцитивная сила H_{cr} , намагниченность насыщения M_s и остаточная намагниченность насыщения M_{rs} . Как оказалось, все образцы содержат, в основном, одно- или псевдооднодоменные зёрна, что является одним из условий применимости метода Телье для определения $H_{др}$. Эти выводы подтверждаются и результатами электронно-микроскопических исследований (рис. 3.2.4.).

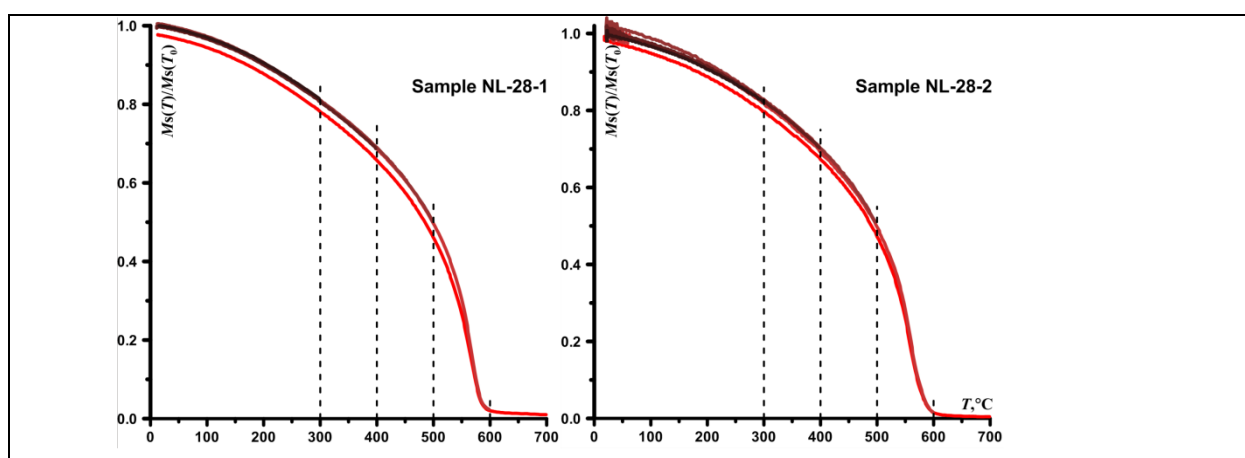


Рисунок 3.2.3. Примеры кривых терморазмагничивания намагниченности насыщения $M_s(T)$ при последовательных нагревах. Видно, что форма кривых на каждом нагреве остаётся практически стабильной, что свидетельствует об устойчивости магнитных минералов к нагревам и является условием достоверного определения $H_{др}$ методом Телье.

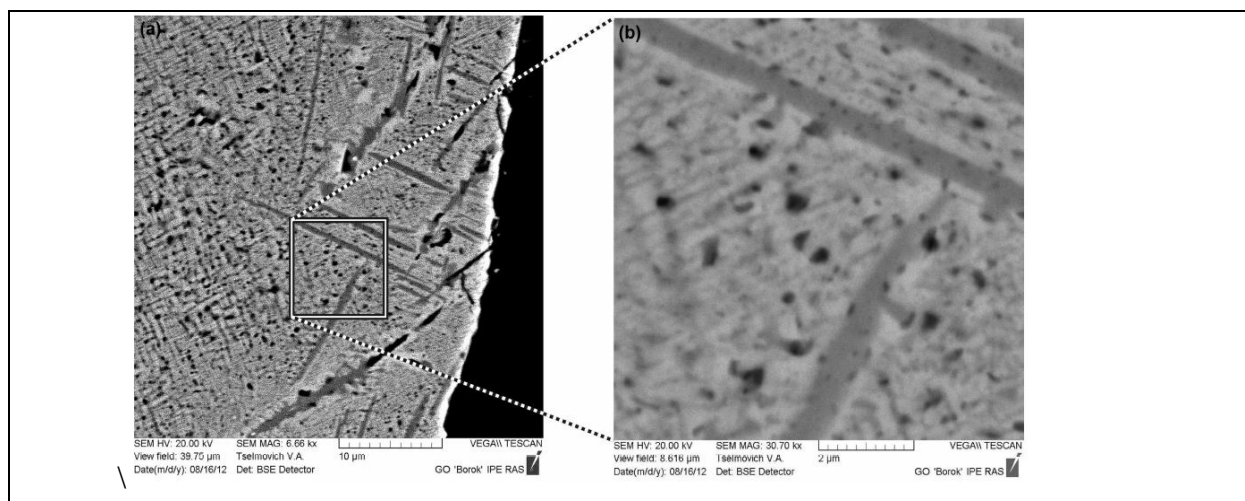


Рисунок 3.2.4. (слева) Микрофотографии (в обратно рассеянных электронах) аншлифа образца 28-2. в исходном состоянии; **(справа)** Увеличенное изображение участка, отмеченного квадратом на рис. 2а).

Как видно из рис. 3.2.4., образцы из сайта 28 демонстрируют типичную структуру гетерофазного распада первичного титаномагнетита на ламелли ильменита, образующие решетчатую структуру и ячейки магнетита. Ключевым здесь является вопрос о температуре, при которой этот распад произошёл. Согласно геотермометру, предложенному Гапеевым и Цельмовичем на основании многочисленных детальных экспериментов по высокотемпературному окислению титаномагнетитов, основным индикатором для определению температуры, при которой произошёл распад, является толщина ламелей ильменита. В случае, когда она превышает 0.1 мкм, эта температура заведомо выше 580 °С. Именно этот мы и наблюдаем на рис. 3.2.5. С большой степенью надёжности по совокупности всех экспериментальных данных можно утверждать, что в сайте 28 мы имеем дело с первичной термоостаточной намагниченностью ($pTRM$).

Определение $H_{др}$ проводилось по методу Телье-Коэ с обязательной процедурой проверочных нагревов («чек-точки») после каждого двух температурных шагов (рис. 3.2.5.). В экспериментах по определению $H_{др}$ нами использованы породы 78 штучков, отобранных из 12 разных сайтов, всего выполнено определений на 117 кубиках, включая дубли.

Основные результаты. К сожалению, надежные результаты по палеонапряженности получены на породах только одного сайта (NL-28), их возраст 1.85 млрд. лет. Породы сайта NL-28 демонстрируют чрезвычайную устойчивость магнитных минералов к нагревам, их точки Кюри близки к магнетитовым. Их кривые терморазмагничивания $NRM(T)$ и $TRM(T)$ подобны, а положения чек-точек на диаграммах Араи-Нагата близки к начальным величинам $pTRM$. Семь образцов (13 кубиков-дублей) показали близкие значения $H_{др}$, которые меняются в интервале 13-23 мкТл со средней величиной 18.0 ± 3.2 мкТл. Соответствующее значение

виртуального дипольного момента (VDM) равно $(2.8 \pm 0.5) \times 10^{22}$ Ам², что в 3 раза меньше его современной величины.

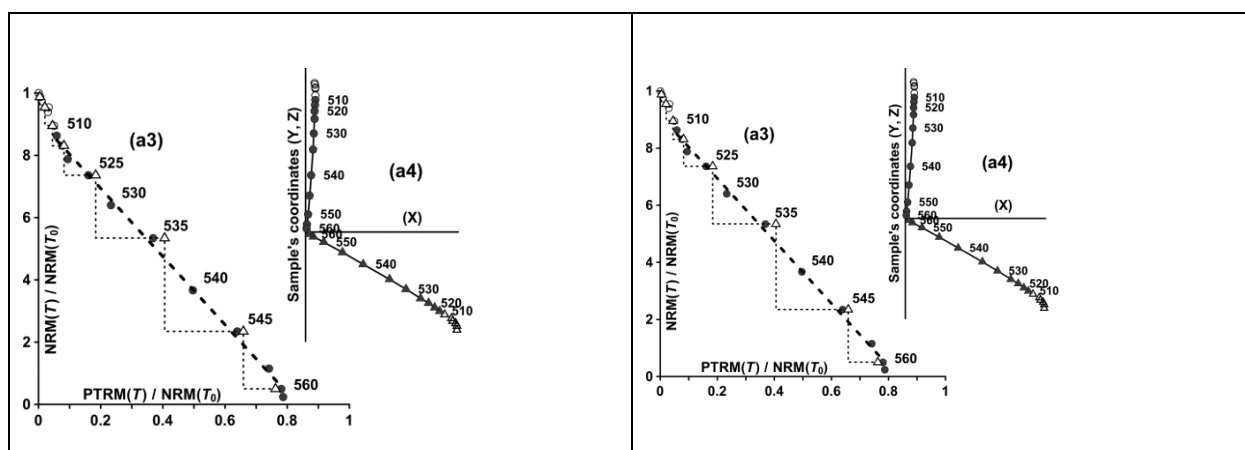


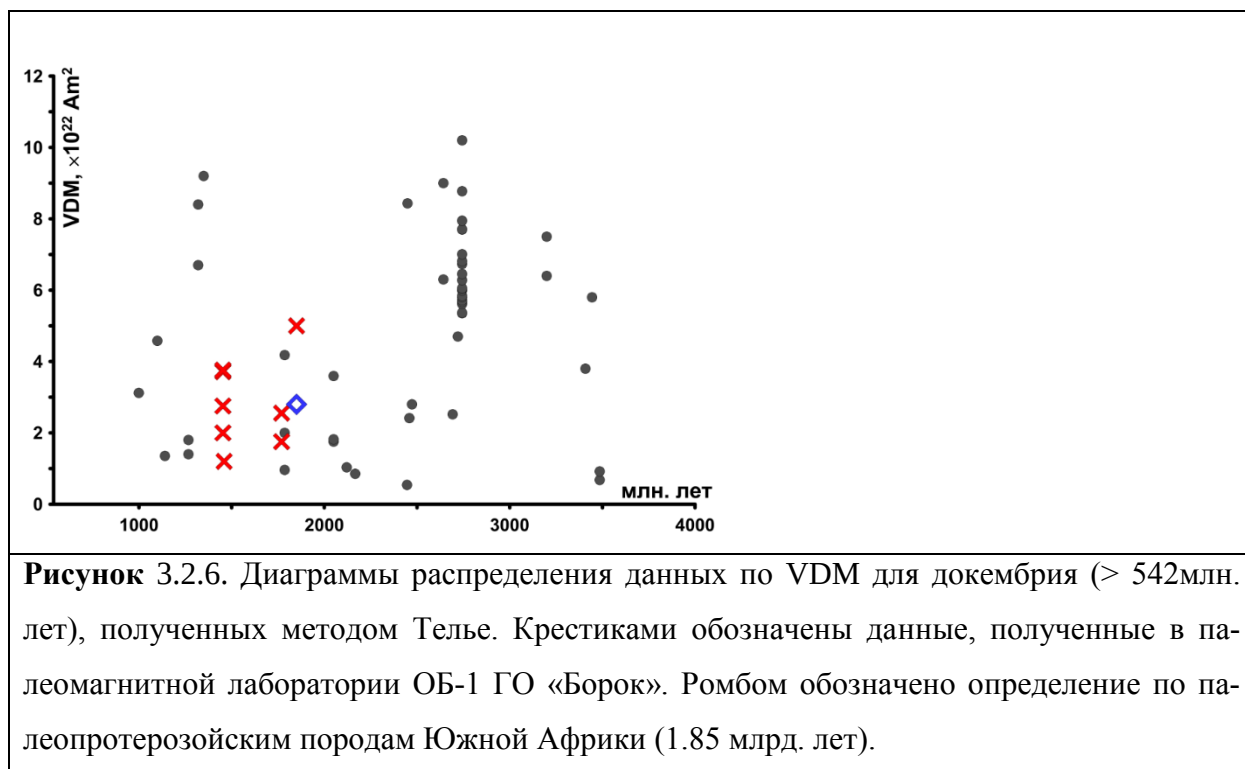
Рисунок 3.2.5. Два примера диаграмм Арай-Нагата (слева) и Зийдervильда (справа). Номера образцов: ТД-28-1 слева и NL-28-2 – справа. Треугольниками обозначены «чек-точки». Видно, что они достаточно близки к первоначальным значениям рТRМ(T_i), т.е. образец не претерпевает значительных магнитоминералогических изменений во время нагревов.

Обсуждение.

Согласно современным моделям тепловой эволюции Земли, твёрдое ядро в ней могло появиться не раньше начала протерозоя [Aubert et al., 2009], а возможно, и не раньше 1 млрд. лет назад. Наши и литературные данные определенно поддерживают эту гипотезу, поскольку при отсутствующем твёрдом внутреннем ядре эффективность генерации геомагнитного поля относительно невелика. Соответственно, невелика была и палеонапряженность, что и объясняет доминирование низких значений VDM в протерозое, как это видно на рис. 3.2.6. Подчеркнём, что низкая эффективность генерации геомагнитного поля при отсутствии твёрдого ядра должна согласно сопрягаться с малой частотой инверсий, о чём говорят и имеющиеся в литературе данные по этому вопросу [Coe and Glatzmaier, 2006].

При этом, высокое значение поля в позднем архее (рис. 3.2.6.) вполне вписывается в схему тепловой эволюции Земли с высоким начальным тепловым потоком. Отметим, что она также не допускает возникновение твёрдого ядра ранее 1 млрд. лет назад. Однако, эта же модель предсказывает слишком низкую величину поля к настоящему времени. Альтернативная модель с низким тепловым потоком предсказывает высокое современное поле, но малое поле в архее. Причин для такого расхождения эмпирических данных и теоретических конструкций может быть несколько:

1. более сложная модель тепловой эволюции Земли, комбинирующая черты моделей с высоким и низким начальным тепловым потоком (что допускается авторами работы [Aubert et al., 2009];
2. модель работы геодинамо, несоответствующая реальности;
3. заметное количество ошибочных определений палеонапряжённости в докембрии, так что в совокупности эти ошибки существенно исказили картину эволюции поля в этот громадный по протяжённости геологический интервал.



В настоящее время нет возможности выбрать из этого списка наиболее вероятную причину несогласованности экспериментальных данных и наших представлений о поведении поля в далёком геологическом прошлом. Очевидно, здесь требуется большая работа во всех указанных направлениях.

Выводы. Согласно как полученным в результате выполнения Проекта, так и опубликованным в литературе данным, средняя интенсивность геомагнитного поля в протерозое была в 2-3 раза меньше его современной величины, что свидетельствует в пользу гипотезы о позднем (не ранее 1 млрд. лет назад) возникновении твёрдого ядра

3.3. Характер изменения частоты геомагнитных инверсий на протяжении геологической истории.

Суперхрон на границе мезопротерозоя и неопротерозоя

Важной частью Проекта является исследование характера изменений частоты геомагнитных инверсий в позднем протерозое. Поздний докембрий представляет существенный интерес, поскольку, с одной стороны, число магнитостратиграфических данных для него крайне ограничено, с другой стороны, имеется довольно большое количество слабо измененных объектов этого возраста, и, с третьей стороны, потому, что только изучая и сравнивая отдаленные эпохи, возможно уверенно зафиксировать долговременные эволюционные изменения магнитного поля Земли и, через них, выйти на понимание эволюции внутренних оболочек нашей планеты.

Объекты исследований. В рамках настоящей работы основным объектом наших исследований явилась свита линок Туруханского опорного разреза рифея (рис. 3.3.1.). Выбор этой свиты определяется наличием в ней качественной палеомагнитной записи, хорошей био- и хеостратиграфической изученностью, наличием относительно хороших возрастных ограничений, хорошей обнаженностью и относительно простой доступностью. Свита линок представлена преимущественно серыми, палевыми, зеленовато-серыми и темно-серыми глинистыми известняками и алевролитами, имеет мощность до 280 м. Возраст свиты отвечает самому концу мезопротерозоя и, согласно существующим на настоящий момент данным, лежит в интервале 1000-1050 млн. лет.

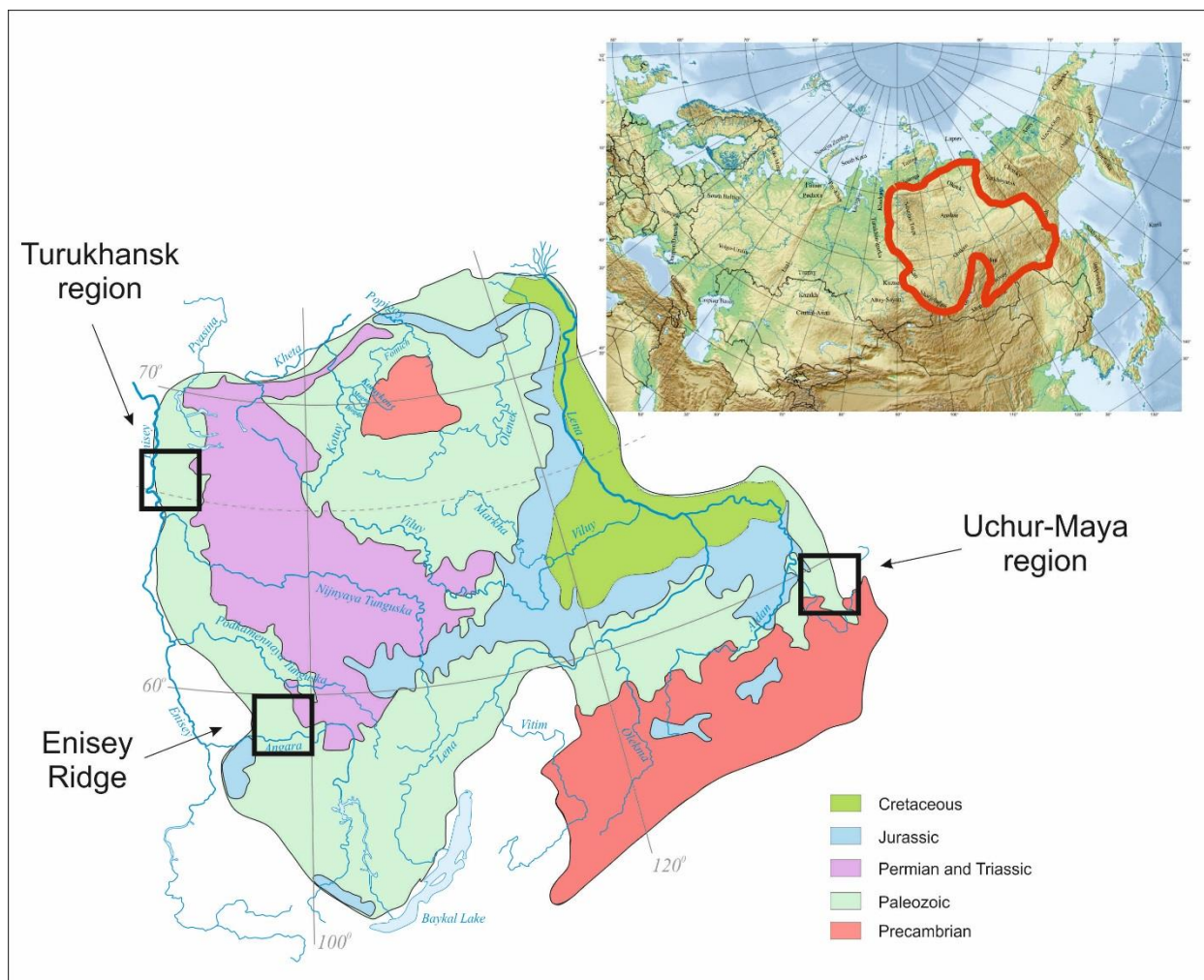


Рисунок 3.3.1. Географическое положение Туруханского и других основных опорных разрезов рифея Сибирской платформы.

Существует целый комплекс биостратиграфических, хемотратиграфических, литологических, геохронологических и др. аргументов, позволяющих коррелировать свиту линок с уже хорошо изученными нами свитами малгина (Учуро-Майский регион) и карточки (Енисейский кряж), что делает ее особенно ценным объектом для решения вопроса о существовании мезо-неопротерозойского суперхрона, на возможность существования которого указывали данные, полученные нами по этим разрезам [Gallet et al., 2012].

Нами было изучено шесть удаленных друг от друга на десятки километров разрезов свиты линок (рис. 3.3.2.), из которых в общей сложности было отобрано более 800 ориентированных образцов для детального изучения магнитостратиграфии этой свиты.

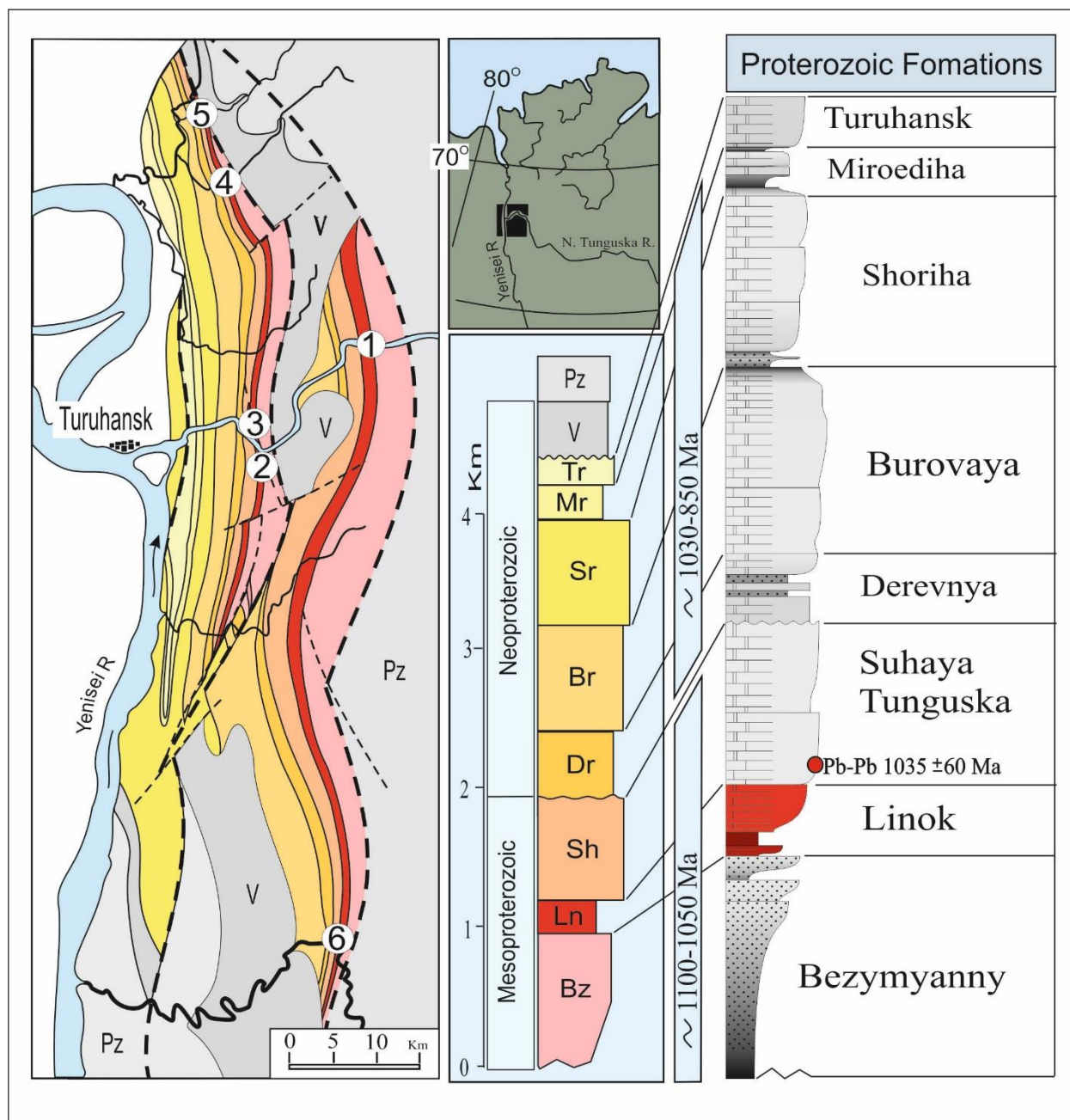


Рисунок 3.3.2. а. Стратиграфия Туруханского опорного разреза, геологическая схема региона и географическое положение изученных разрезов.



Рисунок 3.3.2. б. Обнажение свиты линок, р. Сухая Тунгуска.

Результаты исследований. Выполненные лабораторные исследования (рис. 3.3.3.) показали, что большинство образцов содержит две компоненты естественной остаточной намагниченности, наиболее стабильная (высокотемпературная) из которых успешно проходит тест складки, тест обращения (компонента имеет биполярное распределение) и тест конгломератов. Эти результаты определенно указывают на то, что выделенная высокотемпературная компонента сформировалась во время или вскоре после накопления свиты линок. В отдельных разрезах наблюдается также третья, среднетемпературная метакронная компонента намагниченности, сформировавшаяся, вероятно, в позднем палеозое в ходе тектонических процессов, связанных с закрытием Уральского океана и амальгамации Сибирского и Восточно-Европейского кратонов.

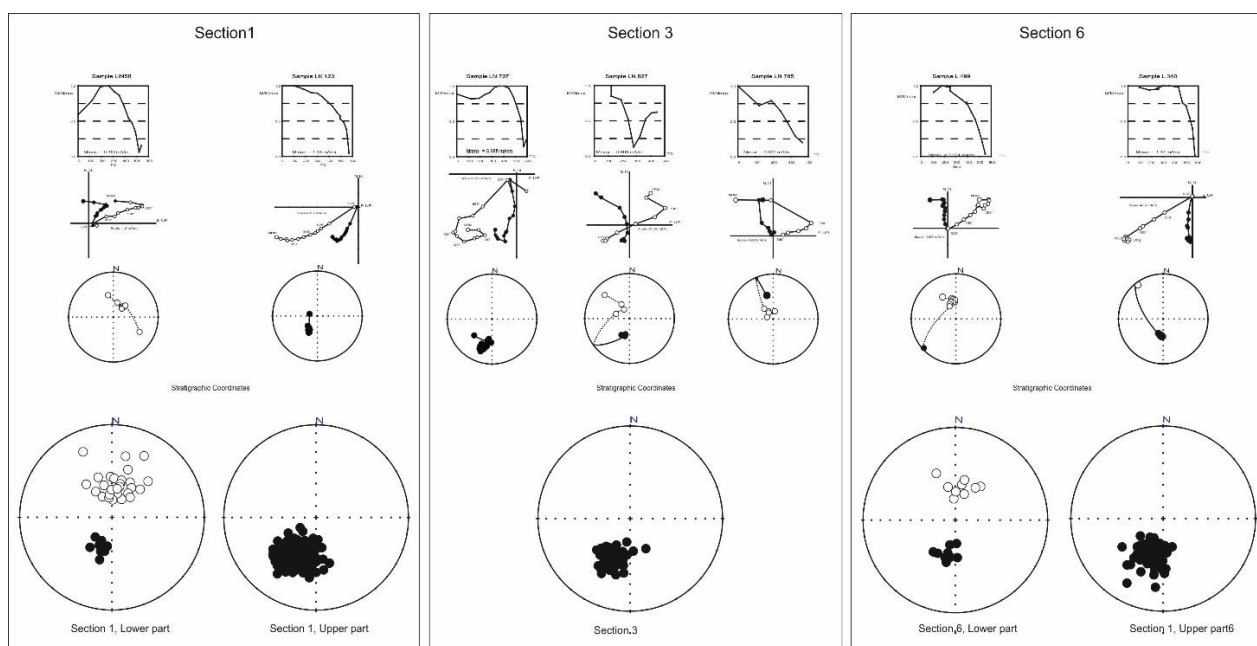


Рисунок 3.3.3. Результаты лабораторных исследований естественной остаточной намагниченности свиты линок.

Магнитостратиграфическая запись, полученная по изученным обнажениям свиты линок показана на рис. 3.3.4. Как видно из рисунка, в нижней части свиты присутствует несколько (до 11) интервалов разной полярности, вслед за чем мы видим полное преобладание пород, намагниченных только в прямой полярности. Мощность соответствующего интервала местами превышает 200 м, что, учитывая имеющиеся оценки скорости осадконакопления свиты, отвечает интервалу времени не менее 20-25 млн. лет – т.е. полноценному геомагнитному суперхрону. Важно отметить, что изученные нами вышележащие породы деревнинской свиты (ранний неопротерозой) намагниченны также исключительно в прямой полярности, что указывает на возможное продолжение суперхрона в неопротерозой и возможную длительность не менее 40 млн. лет.

Обсуждение результатов. Прежде всего, полученный по свите линок палеомагнитный полюс интересно сравнить с близкими по возрасту полюсами малгинской свиты (Учуро-Майский район) и свиты карточки (Енисейский кряж).

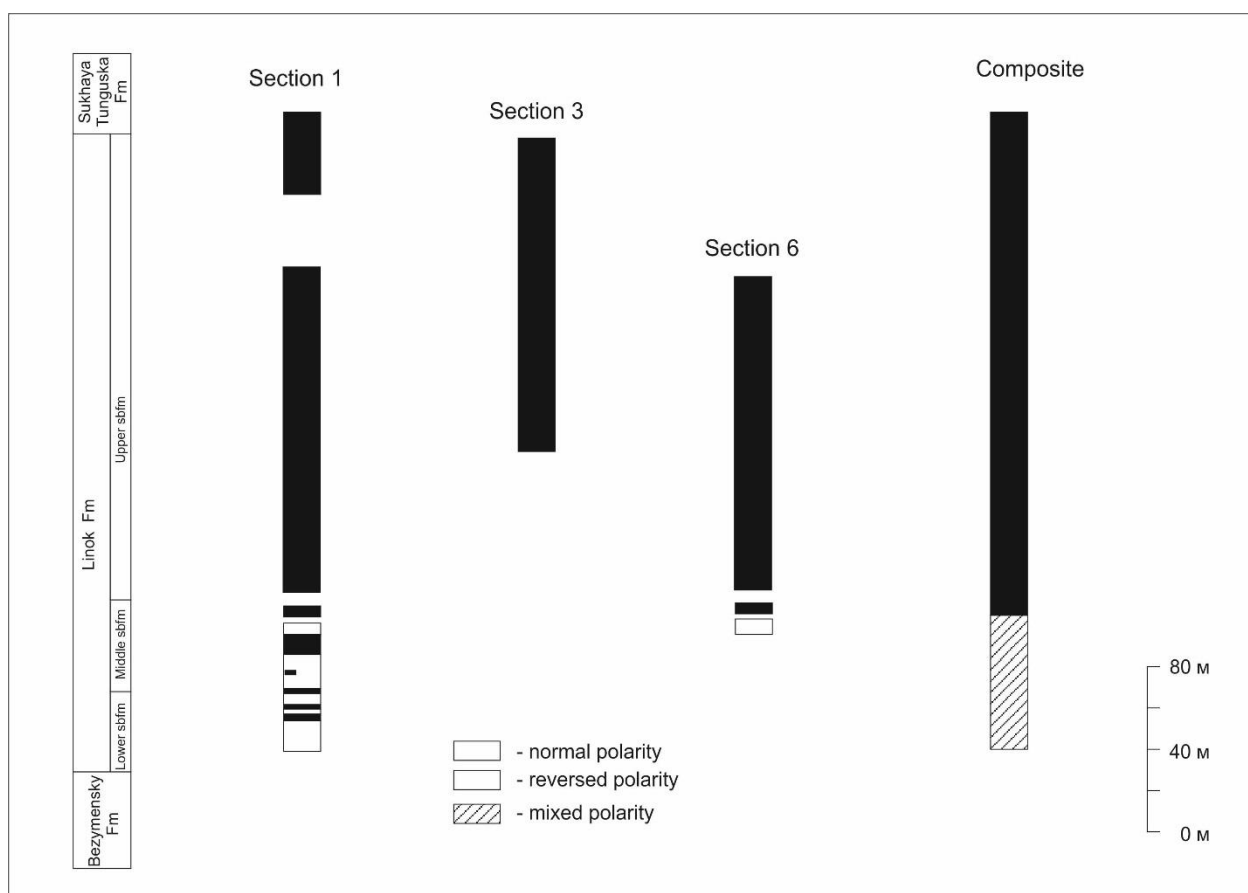


Рисунок 3.3.4. Магнитостратиграфия свиты линок.

Как видно из рис. 3.3.5., малгинский полюс и полюс свиты линок практически совпадают после внесения поправки на закрытие Вилуйской рифтовой системы [Pavlov et al., 2008], а полюс свиты карточка хорошо согласуется с постмалгинской (ципандинской) частью тренда Учуро-Майских полюсов, при допущении небольших вращений Восточно-Ангарского террейна (по которому получен полюс свиты карточка) относительно Сибирской платформы [Верниковский и др., 2006].

Наблюдаемое соответствие полученных полюсов дает еще одно важное доказательство трансплатформенной корреляции (близости по возрасту) свит карточка, малгина и линок. Это позволяет совместно рассматривать полученные по ним магнитостратиграфические данные (рис. 3.3.6.).

Магнитостратиграфические данные по этим свитам отлично согласуются, уверенно подтверждая существование на границе мезо- и неопротерозоя геомагнитного суперхрона длительностью порядка 40 млн. лет

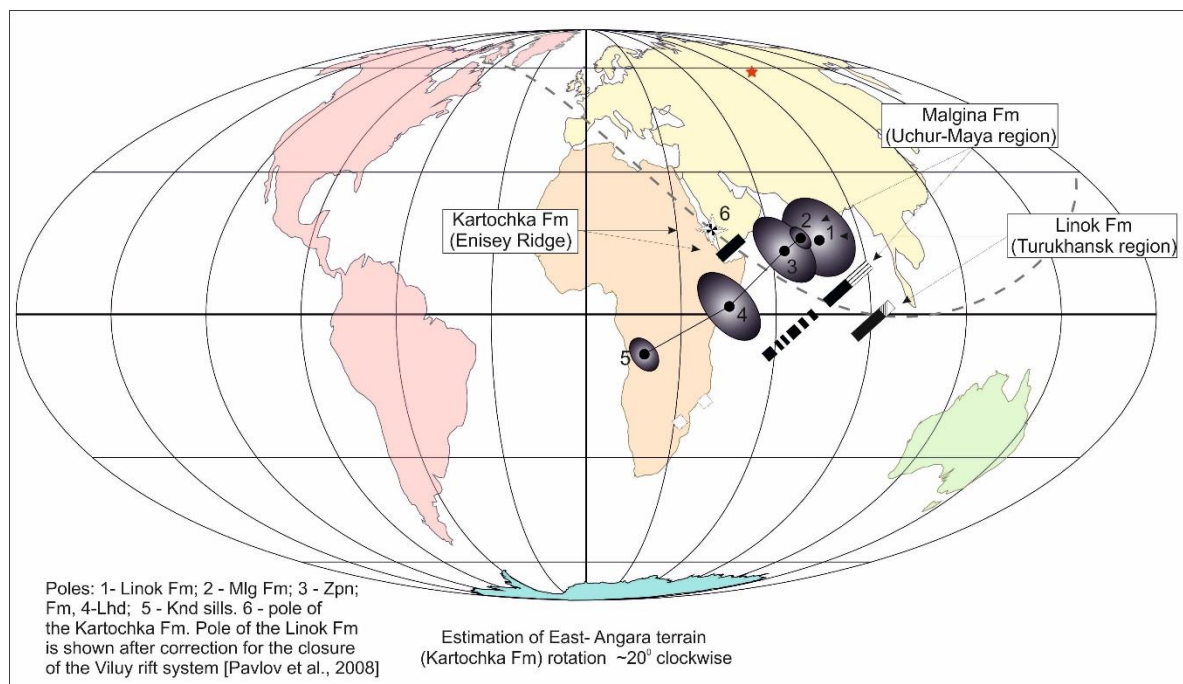


Рисунок 3.3.5. Сравнение палеомагнитных полюсов и магнитной полярности, полученных по опорным разрезам Учуро-Майского и Туруханскому районов и Енисейского Кряжа.

Выводы. По результатам выполненных исследований получен новый палеомагнитный полюс для Ангаро-Анабарского блока Сибирской платформы (Туруханский регион) возраста 1.0-1.05 млрд. лет. На основе независимых палеомагнитных данных подтверждена корреляция основных опорных разрезов рифея Сибирской платформы [Семихатов и Серебряков, 1983]. Доказано существование геомагнитного суперхрона на границе мезо- и неопротерозоя и получены временные ограничения на его длительность (~ 40 млн. лет).

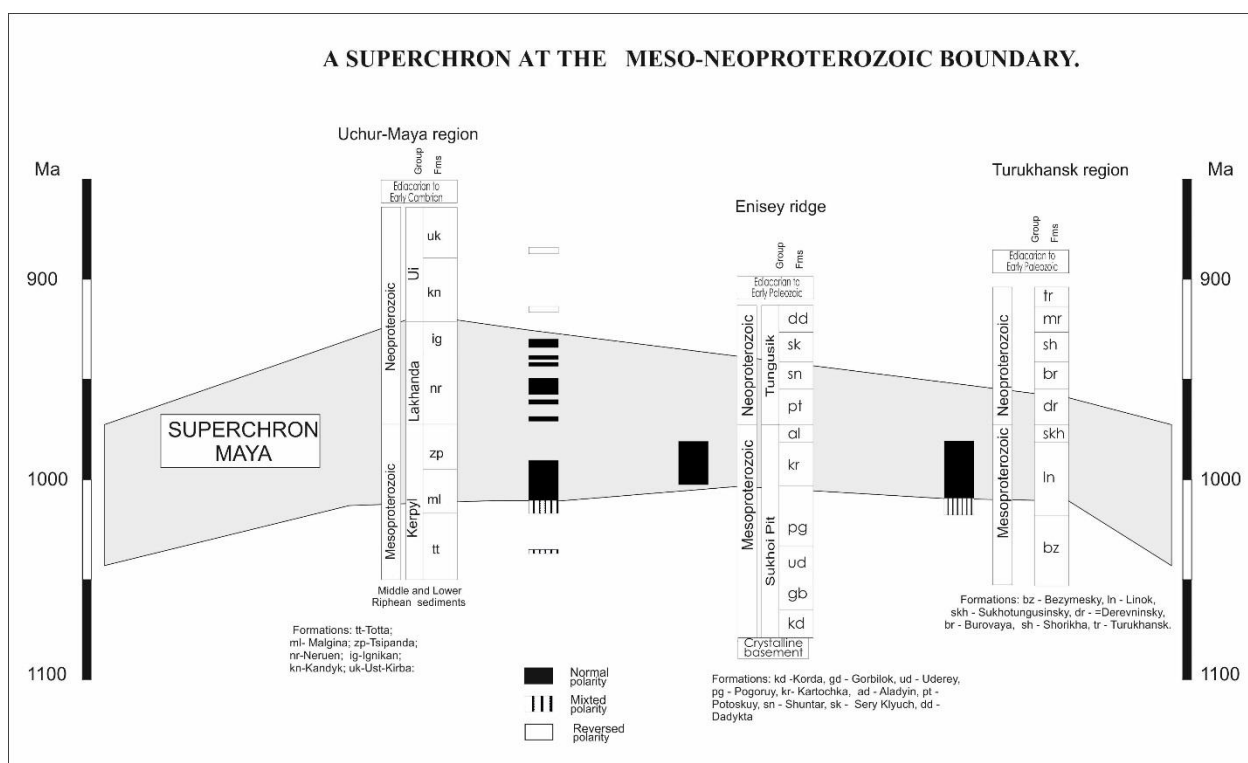


Рисунок 3.3.6. Магнитостратиграфическая корреляция свит линок, малгина и карточки. Доказательство существования суперхрона на границе мезо- и неопротерозоя.

3.4. Модель инверсионного процесса.

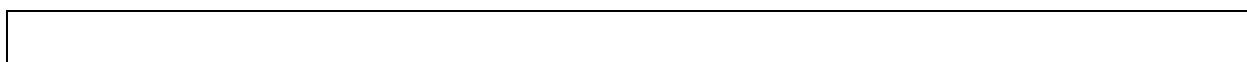
В этой части работы была сделана попытка обобщения наших данных с учетом знаний, полученных ранее при изучении долговременной эволюции инверсионного процесса на протяжении последних 150 млн лет по результатам исследований морских линейных аномалий и более древних периодов геологической истории по данным магнитостратиграфических исследований. Выполненный анализ позволяет предложить довольно простой сценарий, объясняющий многообразие форм проявления инверсионного процесса на протяжении его эволюции в ходе геологической истории.

Идея о том, что инверсионный процесс медленно эволюционирует в масштабе времени порядка десятков миллионов лет, возникла в 80-х годах прошлого столетия и до сих пор широко используется при описании последовательности геомагнитных инверсий в течение последних 150 млн лет. В значительной степени эта идея опирается на видимое постепенное нарастание частоты геомагнитных инверсий после завершения мелового суперхрона (см., напр., [McFadden, McElhinny, 1984]). Однако, вывод о прогрессивном нарастании частоты инверсий существенным образом зависит от длительности нескольких магнитополярных

хронов, чья целостность может быть поставлена под сомнение. Более того, авторы статьи [Gallet et al., 2012] обратили внимание на то, что в конце перми – самом начале триаса, т.е. практически сразу после завершения каменноугольно-пермского суперхрона Киама, частота геомагнитных инверсий была относительно высока и составляла ~3 инверсии за 1 млн лет. Отметим, что подобное быстрое восстановление инверсионного процесса после выхода из суперхрона, обнаруженного вблизи временного уровня ~1.4млрд лет, было отмечено в статье [Elston et al., 2002]. С другой стороны, внезапная остановка инверсионного процесса при “включении” суперхрона поддерживается результатами исследований, выполненных [Hulot, Gallet, 2003] для мелового суперхрона и [Pavlov, Gallet, 2010] для мезо-неопротерозойского суперхрона Мая.

Приведенные примеры позволяют говорить о резких и внезапных изменениях в эволюции инверсионного процесса. Это касается моментов установления и прекращения суперхронов, а также, по-видимому, эпизодов, отвечающих крайне высокой частоте геомагнитных инверсий. Представляется, что такие эпизоды с крайне высокой частотой инверсий (>10–15 инверсий за 1 млн лет) не могут быть сопоставлены с интервалами времени, когда частота инверсий была 3–5 инверсий за 1 млн лет (напр., миоцен, поздняя юра, проздий триас – (Channell, Opdyke, 1996) или даже несколько выше (средний кембрий, ранняя юра).

Таким образом, попытки описания эволюции частоты геомагнитных инверсий путем ее представления как постепенного процесса сталкиваются с существенными трудностями, которые побуждают нас к рассмотрению альтернативной, одновременно радикальной и простой идеи, согласно которой в инверсионном процессе существует три рабочих режима, внезапно (в масштабах первых миллионов лет) сменяющих друг друга, а именно:



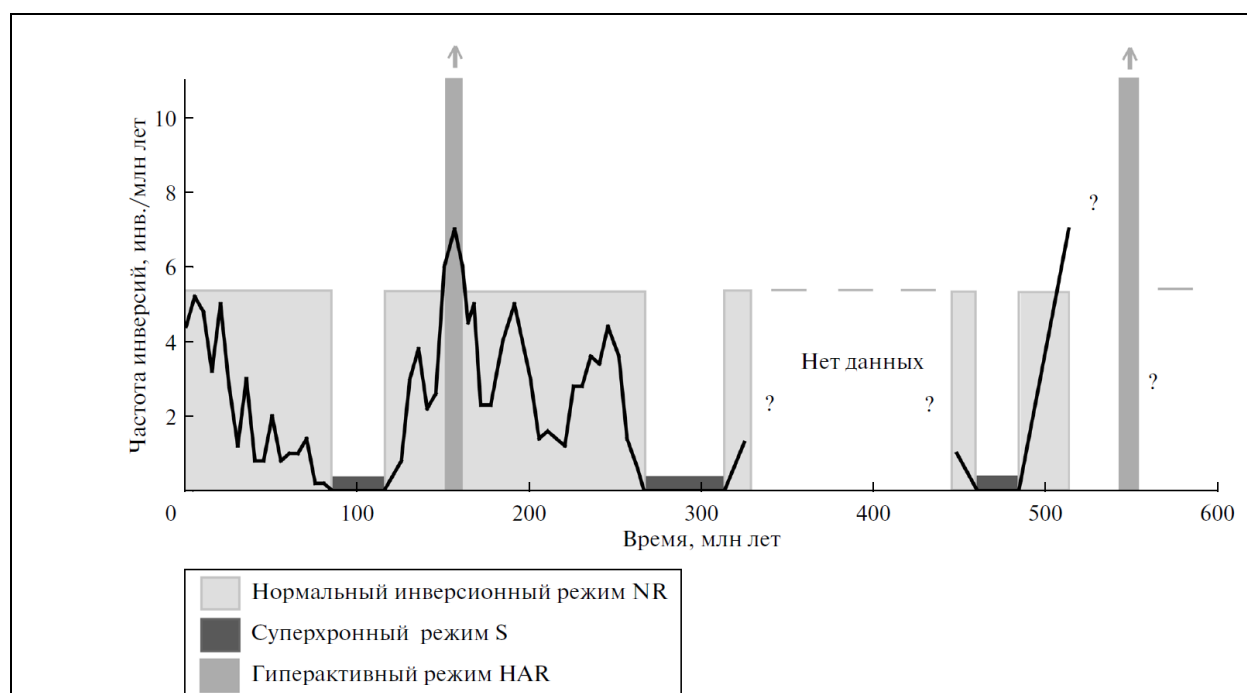


Рисунок 3.4.1.. Схематическое изображение долговременной эволюции инверсионного процесса геодинamo в течение фанерозоя. Черная линия представляет характер изменения частоты геомагнитных инверсий в течение последних 150 млн лет и ранее. В последнем случае частота инверсий была рассчитана с использованием данных о длительности соответствующих геологических эпох. Смена режимов работы геодинamo показана: светло-серый цвет соответствует режиму NR: серый – режиму S, а темно-серый – режиму HAR.

1) *нормальный инверсионный (normal reversing NR) режим*, в течение которого распределение геомагнитных инверсий описывается случайным стационарным процессом (отражающим нелинейную природу магнито-гидродинамического процесса, действующего в ядре с частотой инверсий порядка 3 за 1 млн лет. В частности, такой режим реализовывался с момента завершения суперхрона Киамы в поздней перми до момента наступления среднеюрского эпизода гиперактивности, а также на всем протяжении времени после завершения мелового суперхрона.

2) *неинверсионный “суперхронный” режим S*, для которого свойственно существование длительных интервалов времени без инверсий, как это было на значительном протяжении мела, каменноугольно-пермского времени и ордовика. Мы относим к проявлениям этого режима также все хроны с длительностью порядка 4 млн лет и более. В частности, это касается хронов C33n и C33r, существовавших сразу после завершения мелового суперхрона.

3) *гиперактивный (hyperactive reversing – HAR) режим*, характеризующийся крайне высокой (более 10–15 за 1 млн лет) частотой геомагнитных инверсий. По крайней мере, 2

эпизода, соответствующих этому режиму, имели место в течение последних 600 млн лет – в средней юре и вблизи границы докембрия и фанерозоя [Bazhenov et al., 2016].

Интересно, что предлагаемая нами схема (см. рис. 3.4.1.) переключается с поведением солнечного динамо, рассматриваемым в масштабе времени порядка тысяч лет, хотя процессы, лежащие в основе описываемых явлений, и их характерные времена совершенно различны. В статье [Usoskin et al., 2014] показано, что эволюция солнечной активности на протяжении последних 3 тысячелетий может быть описана как смена трех мод: преобладающей “нормальной” моды, моды, связанной с Большими Минимумами и третьей, более редкой модой, связанной с Большими Максимумами. Опираясь на эту аналогию, суперхроны и HAR эпизоды, подобно солнечным Большим Максимумам и Большим Минимумам, должны рассматриваться не как “хвосты” распределения, свойственного нормальной моде, но, скорее, как события, отражающие существование ограниченного числа особых режимов работы геодинамо, способных резко переключаться между собой.

Наша модель включает в себя возможность модуляции долговременной эволюции геодинамо мантийной динамикой. В этом отношении другая аналогия с поведением солнечного динамо могла бы быть полезна. В статье [Usoskin et al., 2014] показано, что в течение голоцена частота Солнечных Больших Минимумов и Больших Максимумов варьировала согласно так называемому циклу Холстатта, имеющему период ~2400 лет. Выполненный этими авторами анализ показал, что циклы Холстатта модулируют вероятность реализации мгновенных переходов между различными модами функционирования солнечного динамо. При этом Большие Минимумы (Максимумы) соответствуют нижним (верхним) интервалам цикла.

В нашей схеме мы принимаем, что мантийная конвекция, связанная с циклами Вильсона, может играть ту же роль в переключении режимов геодинамо, что и процессы, определяющие цикл Холстатта, в переключении мод солнечного динамо. Контролируя термальные условия на границе ядро–мантия, мантийная динамика может обуславливать внезапное установление различных рабочих режимов инверсионного процесса и/или их переключение. В этом смысле предлагаемая нами гипотеза хорошо согласуется со взглядами многочисленных исследователей на роль мантийной конвекции в работе геодинамо.

Если вслед за рядом авторов принять возможность позднего (позднее 1 млрд лет назад – [Aubert et al., 2009] образования ядра, то, исходя из предлагаемой схемы, можно предположить, что на протяжении большей части докембрия переходы геодинамо от одного режима к другому совершались более часто. Этого следует ожидать в силу того обстоятельства, что влияние распределения теплового потока на границе ядро-мантия на работу геодинамо было значительно сильнее до нуклеации ядра, чем позже [Wicht et al., 2011].

Наша модель, несмотря на то, что она носит предварительный характер, видимо уже сейчас в значительной степени может объяснить многообразие проявления инверсионного процесса на протяжении геологической истории и его сложность. Эта сложность может возникать за счет перекрытия двух процессов с сильно различающимися характерными временами – процесса геодинамо с внезапными (в масштабах миллионов лет) переходами и процесса мантийной конвекции, чьи характерные времена составляют многие десятки и сотни миллионов лет. Мы признаем, что тестирование нашей модели представляет собой не простую задачу. Важным шагом в ее подтверждении явилось бы обнаружение периодов гиперактивности внутри суперхронов. К сожалению, эта “идеальная” ситуация может оказаться крайне редкой, если мантийная динамика действительно оказывает сильное влияние на долговременную эволюцию геодинамо. Другим хорошим тестом было бы обнаружение двух или нескольких суперхронов на относительно коротком временном интервале. Тем не менее настоящая работа подчеркивает важность дальнейших исследований, как суперхронов, так и периодов гиперактивности, из которых последние до сих пор остаются плохо изученными. С этой точки зрения особый интерес представляет интервал времени между поздним ордовиком и каменноугольным периодом (т.е. между завершением суперхрона Мойеро и установлением суперхрона Киамы), для которого современные надежные магнитостратиграфические данные практически отсутствуют.

Вывод. Для описания эволюции инверсионного процесса предложена модель, которая предполагает существование трех рабочих режимов в инверсионном процессе, а именно: 1) нормального инверсионного режима, в течение которого распределение геомагнитных инверсий описывается случайным стационарным процессом с частотой инверсий порядка 3 инверсий за 1 млн лет; 2) неинверсионного “суперхронного” режима, для которого свойственно существование длительных интервалов времени без инверсий; 3) гиперактивного инверсионного режима, характеризующегося крайне высокой частотой геомагнитных инверсий. Модель также предполагает, что переход от одного режима работы геодинамо к другому может совершаться внезапно (в масштабах первых миллионов лет), при этом вероятность перехода от одного режима к другому может напрямую зависеть от характера распределения теплового потока на границе ядро–мантия. При этом до формирования внутреннего ядра в докембрии такие переходы могли быть более частыми из-за более сильного влияния термальных условий на границе ядро–мантия на работу геодинамо.

3.5. Интерпретация и синтез позднепермских палеомагнитных данных по объектам, расположенным вдоль палеомеридиана. Тестирование дипольности геомагнитного поля на границе перми и триаса.

Актуальность исследований

Актуальность проводимых исследований определяется необходимостью проверки одной из основ палеомагнитологии – гипотезы центрального осевого диполя для границы палеозойской и мезозойской эр. Вопрос о справедливости гипотезы центрального осевого диполя для границы перми и триаса уже давно обсуждается палеомагнитным сообществом [Veselovskiy and Pavlov, 2006; Evans et al., 2014 и ссылки в них]. Одной из причин, вследствие которой ранее было выдвинуто предположение о возможности существенного (более 5-10% от поля диполя) вклада зональных недипольных компонент в магнитное поле Земли около 252 млн. лет назад, являлось значимое различие одновозрастных палеомагнитных полюсов Сибирской и Восточно-Европейской платформ, входивших в то время в состав суперконтинента Лавразия, считающегося единой литосферной плитой. Упомянутое различие выражалось в систематическом смещении палеомагнитных полюсов Восточно-Европейской платформы от одновозрастных полюсов Сибири вдоль палеомеридиана – т.н. «far-side» эффект [Bazhenov and Shatsillo, 2010]. Среди наиболее вероятных причин этого эффекта предлагались (а) значимый вклад недипольных (квадрупольной и/или октупольной) компонент в магнитное поле Земли или (б) неучёт эффекта занижения наклонения в палеомагнитных данных по Восточно-Европейской платформе, большая часть которых получена по осадочным породам: допущение даже незначительного ($\sim 10\%$, $f=0.9$) занижения наклонения в перм-триасовых осадочных породах Европы делает различие между средними Р-Т палеомагнитными полюсами Сибири и Восточно-Европейской платформы статистически незначимым [Veselovskiy and Pavlov, 2006; Bazhenov and Shatsillo, 2010].

Недавно было убедительно показано [Domeier et al., 2012], что введение поправки за эффект занижения наклонения в палеомагнитные определения, полученные по осадочным породам, позволяет эффективно решить известную проблему реконструкции суперконтинента Пангея. Однако палеомагнитные определения для перми-триаса Восточно-Европейской платформы или «стабильной» Европы, которые получены с учётом эффекта занижения наклонения, пока единичны [Evans et al., 2014] и их получение является актуальной задачей современной палеомагнитологии.

Цель. Главной целью проведённых в 2016 г. исследований являлось тестирование гипотезы центрального осевого диполя для границы перми-триаса с использованием новых палеомагнитных определений, учитывающих занижение наклона в осадочных породах.

В ходе работы решались следующие задачи:

- 1) Получение новых надёжных палеомагнитных полюсов Восточно-Европейской платформы для интервала времени поздняя пермь-ранний триас, учитывающих эффект занижения наклона в осадочных породах;
- 2) Составление базы палеомагнитных данных по поздней перми-раннему триасу Восточно-Европейской платформы и сопоставление их с новыми палеомагнитными определениями;
- 3) Оценка возможного вклада зональных недипольных компонент в геомагнитное поле на границе палеозоя и мезозоя путём сравнения одновозрастных средних перм-триасовых полюсов Восточно-Европейской и Сибирской платформ.

Объекты исследований. Результаты получены по 7 разрезам пограничных верхнепермских (P_3) и нижнетриасовых (T_1) континентальных отложений. 4 из них расположены в центральной части Русской плиты в среднем Поволжье (Пучеж, Жуков овраг, Окский съезд) и в Оренбургской области (Астрахановка). 2 разреза озёрных и мелководно-морских отложений были изучены в центральной Германии – Каашвиц (Caaschwitz) и Нелбен (Nelben). Все разрезы сложены красноцветными осадочными породами (red beds) и имеют надёжную привязку к местным стратиграфическим шкалам. Также в работе были использованы результаты магнитных чисток, полученные по материалам сводного перм-триасового разреза р.Сухона (Вологодская область), любезно предоставленные нам А.Г.Иосифиди (ВНИГРИ).

Методы исследований. Полевые и лабораторные исследования, обработка и интерпретация результатов выполнялись по стандартной методике. Отбор ориентированных штучков производился вручную, при помощи геологического молотка и ножа, ориентировка образцов осуществлялась горным компасом с учётом местного склонения согласно модели IGRF (12 поколение). Штучки распиливались на камнерезном станке с алмазным отрезным кругом на кубики с ребром 2 см. Магнитные чистки палеомагнитных коллекций проводились на современном оборудовании в отечественных лабораториях: в Лаборатории главного геомагнитного поля и геомагнетизма ИФЗ РАН на криогенном (SQUID) магнитометре (2G Enterprises, США), установленном в немагнитной комнате, и в петромагнитной лаборатории геологического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова на спин-магнитометре JR-6 (AGICO, Чехия). Размагничивание образцов производилось в немагнитных печах MMTD-80 (Magnetic Measurements, Англия) и TD48 (ASC Scientific, США).

Результаты.

На основе вновь полученных и уже опубликованных результатов создана палеомагнитная БД по пограничным пермо-триасовым осадочным породам и магматическим комплексам Восточно-Европейской платформы (ВЕРП) и «стабильной Европы» для интервала времени 260-245 млн. лет.

На рис. 3.5.1.(а) и в табл. 3.5.1. представлено 7 новых, полученных в результате проведённых исследований палеомагнитных полюсов Восточно-Европейской платформы, вычисленных без учёта эффекта занижения наклона. На том же рисунке, для сравнения, приведены палеомагнитные определения по поздней перми и раннему триасу Русской плиты, полученные в 1960-1980 гг. с использованием устаревших методик и оборудования и вошедшие в созданную нами базу палеомагнитных данных. Важно заметить, что рассматриваемые группы полюсов находятся в очевидном соответствии друг с другом, то есть использование устаревших методик, в данном конкретном случае, не является критическим фактором при селекции палеомагнитных данных.

На рис. 3.5.1. (б) приведены те же новые полюсы Восточно-Европейской платформы, но вычисленные с учётом эффекта занижения наклона в осадочных породах, а также их средний полюс. Сравнение последнего со средним пермо-триасовым (трапповым) полюсом Сибирской платформы [Pavlov et al., 2007] показывает, что эти полюсы статистически значимо не отличаются друг от друга: $\gamma/\gamma_{\text{ср}} = 6.0^\circ/7.7^\circ$ (табл. 3.5.1.). Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод, что наблюдаемое ранее систематическое расхождение палеомагнитных полюсов Сибирской и Восточно-Европейской платформ является следствием проявления эффекта занижения наклона в осадочных породах Восточно-Европейской платформы. И хотя такое предположение высказывалось и ранее, ценность данной работы заключается в получении новых палеомагнитных полюсов, учитывающих эффект занижения наклона, определённый для каждого конкретного разреза индивидуально.

Нельзя, однако, не обойти вниманием тот факт, что большинство скорректированных за занижение наклона палеомагнитных полюсов по конкретным разрезам Восточно-Европейской платформы (рис. 3.5.1.,б) все равно демонстрирует «far-side» эффект относительно Р-Т полюса Сибирской платформы, т.е. удалены от него вдоль палеомеридиана; исключение составляет полюс для разреза Астрахановка, который совпадает с сибирским. Причина этого эффекта видится в несколько разном возрасте сравниваемых Р-Т полюсов Европы и Сибири. Действительно, в разрезе Астрахановка опробован интервал, отвечающий исключительно нижнему триасу, в то время как в остальных разрезах опробовался либо исключительно верхнепермский интервал, либо пограничный пермо-триасовый интервал, при этом, однако, пермская «составляющая» в нём преобладала. Если допустить наличие

существенного перерыва в осадконакоплении между пермскими и триасовыми породами [Граница..., 1998], то следует ожидать «смещение» палеомагнитных полюсов для изученных разрезов в более древнюю часть кривой кажущейся миграции полюса Восточно-Европейской платформы, что и наблюдается. Это предположение определяет первостепенность изучения нижнетриасовых разрезов в ходе дальнейшего решения рассматриваемой проблемы.

Одновременно с работами по получению новых корректных палеомагнитных полюсов выполнялись также детальные магнитостратиграфические исследования ряда опорных разрезов Южной Франции, Центральной Германии, Нижегородской, Оренбургской и Вологодской областей России. Полученные данные позволили разработать или существенно уточнить магнитостратиграфические схемы пермо-триасовых отложений южной Франции, центральной Германии, Среднего Поволжья, Оренбургской области, бассейна Северной Двины.

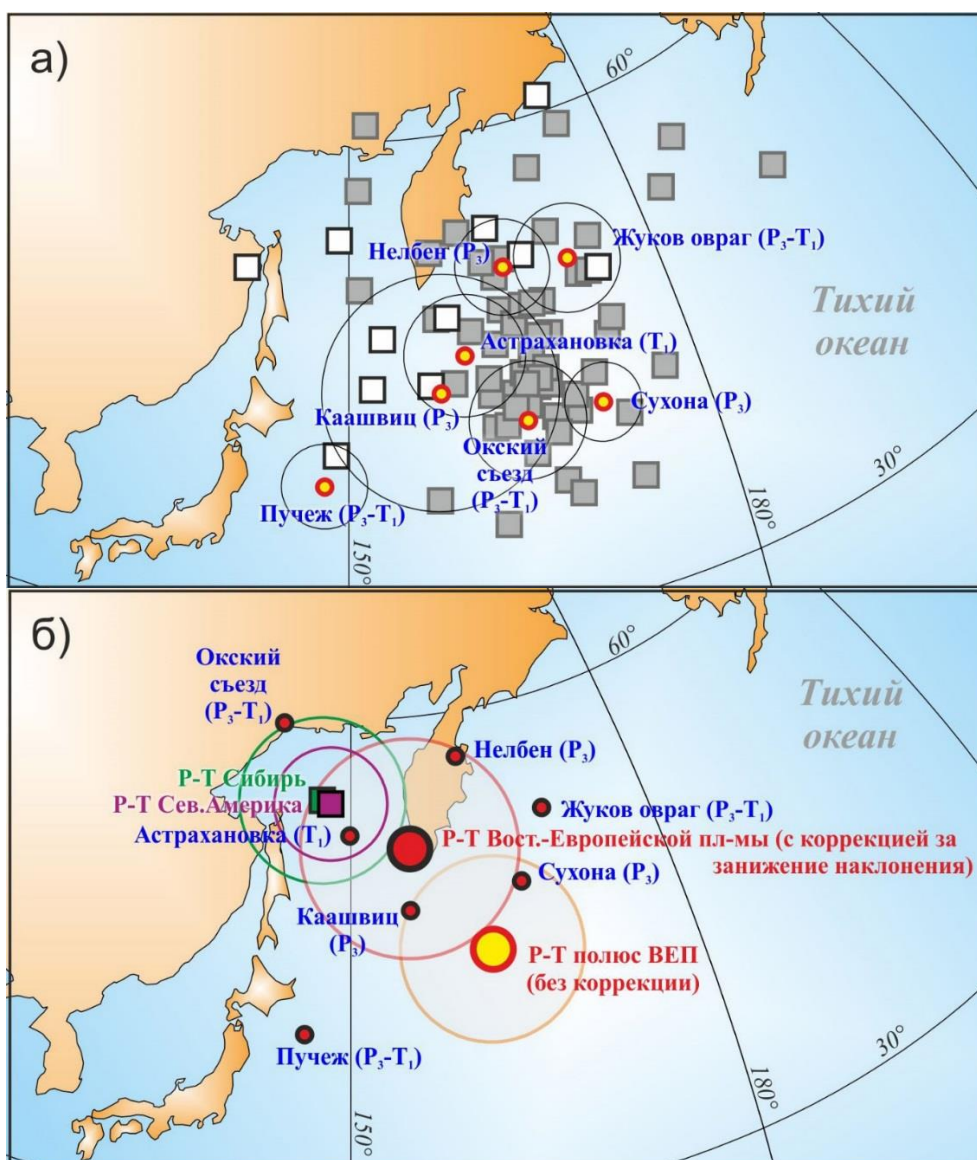


Рисунок 3.5.1. Полученные палеомагнитные полюсы. Сравнение единичных палеомагнитных полюсов Восточно-Европейской платформы для поздней перми (серые квадраты) и раннего триаса (белые квадраты), полученных по устаревшим методикам, с полюсами, полученными в настоящей работе - (жёлто-красные кружки с кругами 95%-го доверия) без коррекции за занижение наклона (а) и (б) - с коррекцией за занижение наклона (красно-чёрные кружки). Черно-красный (красно-желтый) круг – средний полюс с кругом 95%-го доверия для случаев (а) и (б). Фиолетовый полюс – средний Р-Т полюс для Северной Америки [Шацилло и др., 2006]. Зелёный полюс – средний трапповый полюс Сибирской платформы [NSP2, Pavlov et al., 2007].

Таблица 3.5.1.. Палеомагнитные направления и коэффициент занижения наклона f .

№	Разрез				N/n	Географическая СК				Стратиграфическая СК				I_{f-corr} / f
		slat (°N)	slong (°E)			D	I	K	a95	D	I	K	a95	
1	Астрахановка (T ₁)	52.203983	55.715467	NR	101/57	5.0	68.1	26.8	3.7	48.8	46.7	26.8	3.7	56.6/0.7
2	Пучеж (P ₃ -T ₁)	56.99420	43.15810	NR	269/157	36.7	43.8	19.7	2.6	55.7	42.8	19.7	2.6	45.8/0.9
3	Жуков овраг (P ₃ -T ₁)	56.188	42.649	NR	147/106	32.8	43.4	17.9	3.3	-	-	-	-	46.4/0.9
4	Окский съезд (P ₃ -T ₁)	56.2	44.0	NR	144/108	42.9	36.4	15.2	3.6	-	-	-	-	61.5/0.4
5	Saaschwitz (P ₃)	50.953317	11.976383	NR	85/37	25.4	30.7	11.7	7.2	24.0	19.4	11.7	7.2	26.7/0.7
6	Nelben (P ₃)	51.671733	11.743383	NR	119/81	50.2	59.1	29.2	3.0	16.9	29.2	30.3	2.9	38.6/0.7
7	Сухона (P ₃)	61.0	45.0	NR	263/210	39.6	38.2	16.0	2.5	40.3	38.9	16.8	2.4	49.1/0.7

Таблица 2. Палеомагнитные полюсы.

№	Разрез	N	Полюс			Paleolat	С учетом <i>f</i>					Paleolat
			PLat	PLong	dp/dm (B95)		<i>f</i>	PLat	PLong	dp/dm (B95)		
1	Астрахановка (T ₁)	(57)	46.6	160.2	3.1/4.8 (3.9)	27.9	0.7	53.0	149.9	3.9/5.4 (4.6)	37.2	
2	Пучеж (P ₃ -T ₁)	(157)	39.1	148.1	2.0/3.2 (2.5)	24.8	0.9	41.0	146.3	2.1/3.3 (2.6)	27.2	
3	Жуков овраг (P ₃ -T ₁)	(106)	51.1	171.4	2.6/4.1 (3.2)	25.3	0.9	53.2	169.5	2.7/4.2 (3.4)	27.7	
4	Окский съезд (P ₃ -T ₁)	(108)	42.1	164.7	2.4/4.2 (3.2)	20.2	0.4	59.6	142.1	4.3/5.5 (4.9)	42.6	
5	Saaschwitz (P ₃)	(37)	44.5	157.8	3.9/7.5 (5.4)	10.0	0.7	48.4	155.4	4.2/7.8 (5.8)	14.1	
6	Nelben (P ₃)	(81)	51.5	165.0	1.8/3.2 (2.4)	15.6	0.7	57.3	161.7	2.0/3.4 (2.7)	21.8	
7	Сухона (P ₃)	(210)	42.1	171.1	1.8/3.0 (2.3)	22.0	0.7	49.2	165.9	2.2/3.3 (2.7)	30.0	
СИБИРЬ:												
	NSP2 (Pavlov et al., 2007)	8	55.1	147.0	5.0	K=123	Rt+ (EUR-F) = 6.0/7.7 (B)					
ЕВРОПА:												
	EUR (без поправки за занижение)	7	45.5	162.3	5.6	K=117						
	EUR-F (с поправкой за занижение)	7	52.1	155.8	6.6	K=85						
СЕВЕРНАЯ АМЕРИКА:												
	NA-rot (Шацилло и др., 2006)	8	54.9	147.9	3.4	K=296	Rt+ (EUR-F) = 5.5/6.7 (B)					

Выводы:

1) На основе 7 новых палеомагнитных определений, полученных по опорным P₃-T₁ разрезам Русской плиты и центральной Германии и учитывающих эффект занижения наклона, рассчитан новый средний пермо-триасовый палеомагнитный полюс Восточно-Европейской платформы.

2) Создана база палеомагнитных определений по перми-триасу Восточно-Европейской платформы. Генеральное сходство «старых» и новых палеомагнитных данных свидетельствует, в данном случае, о том, что использование устаревших методик не является критическим фактором при селекции палеомагнитных данных.

3) Новый палеомагнитный полюс Восточно-Европейской платформы статистически значимо не отличается от P-T полюсов Сибири и Северной Америки, что является подтверждением справедливости гипотезы центрального осевого диполя для границы палеозоя и мезозоя. Наблюдаемый «far-side» эффект частных палеомагнитных полюсов Восточно-Европейской платформы относительно средних P-T полюсов Сибири и С.Америки может также являться следствием несколько более древнего (позднепермского) возраста среднего полюса Восточно-Европейской платформы.

Блок 4: Изучение геодинамической эволюции Северной Евразии в позднем докембрии и фанерозое.

4.1. Палеомагнитное тестирование гипотезы Шенгера-Буртмана-Натальина (механизм формирования Центрально-Азиатского складчатого пояса).

Актуальность. Центрально-Азиатский подвижный пояс (ЦАПП) – крупнейшая в мире палеозойская складчатая система, разделяющая раннедокембрийские континентальные блоки Северной Евразии – Восточно-Европейский (Балтика) и Сибирский кратоны, Тарим и более мелкие структурные единицы. Формирование ЦАПП связывается с взаимодействием литосферы Палеоазиатского Океана и континентальных масс в течение позднего докембрия – палеозоя, а его внутреннее строение чрезвычайно сложно и характеризуется сочетанием террейнов различной геодинамической природы и возраста, разделенных разрывными нарушениями, среди которых, в современной структуре, определяющая роль отводится сдвигам [Шенгер и др. 1994; Буслов, 2011; Метелкин, 2010; Sengör et al., 1993 и др.].

Геодинамические модели, описывающие формирование ЦАПП, могут быть разделены на три доминирующих концептуальных группы: «аккреционная» [Диденко и др., 1994], «аккреционно-коллизийная» [Buslov et al., 2001; Буслов, 2011 и др.] и «островодужная» [Шенгер и др., 1994; Sengör et al., 1993]. Сторонники «аккреционной модели» рассматривают террейны, входящие в ЦАПП как реликты систем венд-кембрийских островных дуг, развивавшихся в Палеоазиатском океане независимо от Лавразийских кратонов и заложившихся на блоках континентальной коры отколовшихся от Гондваны и последовательно аккретировавших в ордовикское время к южной пассивной окраине Сибири.

Сторонники «аккреционно-коллизийной модели» предполагают существование в венде-раннем кембрии на южной эпибайкальской окраине Сибирского континента активной окраины островодужного типа, на фронте которой, в результате аккреционно-коллизийных процессов сформировался супертеррейн (Казахстанско-Байкальский составной континент), включающий докембрийские микроконтиненты и террейны гондванской группы. Дальнейшее развитие ЦАПП рассматривается как взаимодействие Казахстанско-Байкальского континента (элемента ЦАПП) с Сибирью и Балтикой, где значительная роль в образовании структур отводится позднепалеозойской крупноамплитудной

сдвиговой тектонике, связанной с относительным вращением кратонов и нарушившей первичную тектоническую зональность супертеррейна.

«Островодужная модель» или модель «ШНБ» - Шенгера, Натальина и Буртмана [Шенгер и др., 1994; Sengör et al., 1993] объясняет структуру ЦАПП как результат деформаций и многократного совмещения по системам крупноамплитудных сдвигов элементов единой гигантской островной дуги, заложившейся в венде вдоль уральской окраины Балтики и енисейской окраины Сибири и эволюционировавшей в палеозое (рис 4.1.1.).

С позиций модели ШНБ гипотетическая островная дуга (получившая название Кипчак) заложилась на полосе континентальной коры, отделенной в результате рифтинга от енисейской и уральской окраин Сибири и Балтики, при этом субдукция литосферы Палеоазиатского океана под дугу Кипчак была направлена в сторону кратонов. В качестве современного аналога дуги Кипчак авторы модели рассматривают Алеутскую дугу Тихого океана. Отправной точкой и «граничным условием» модели ШНБ является взаимное положение Сибири и Балтики в венде – начале палеозоя, предполагающее, что в это время кратоны должны были быть структурно сопряжены и обращены друг к другу своими современными северными окраинами, таким образом, что уральская окраина «продолжала» енисейскую.

Таким образом, в отличие от «аккреционной» и «аккреционно-коллизионной» моделей формирования ЦАПП, модель ШНБ критическим образом зависит от взаимного положения Сибири и Балтики в венде – начале палеозоя и может быть тестирована с привлечением палеомагнитных данных по этим кратонам.

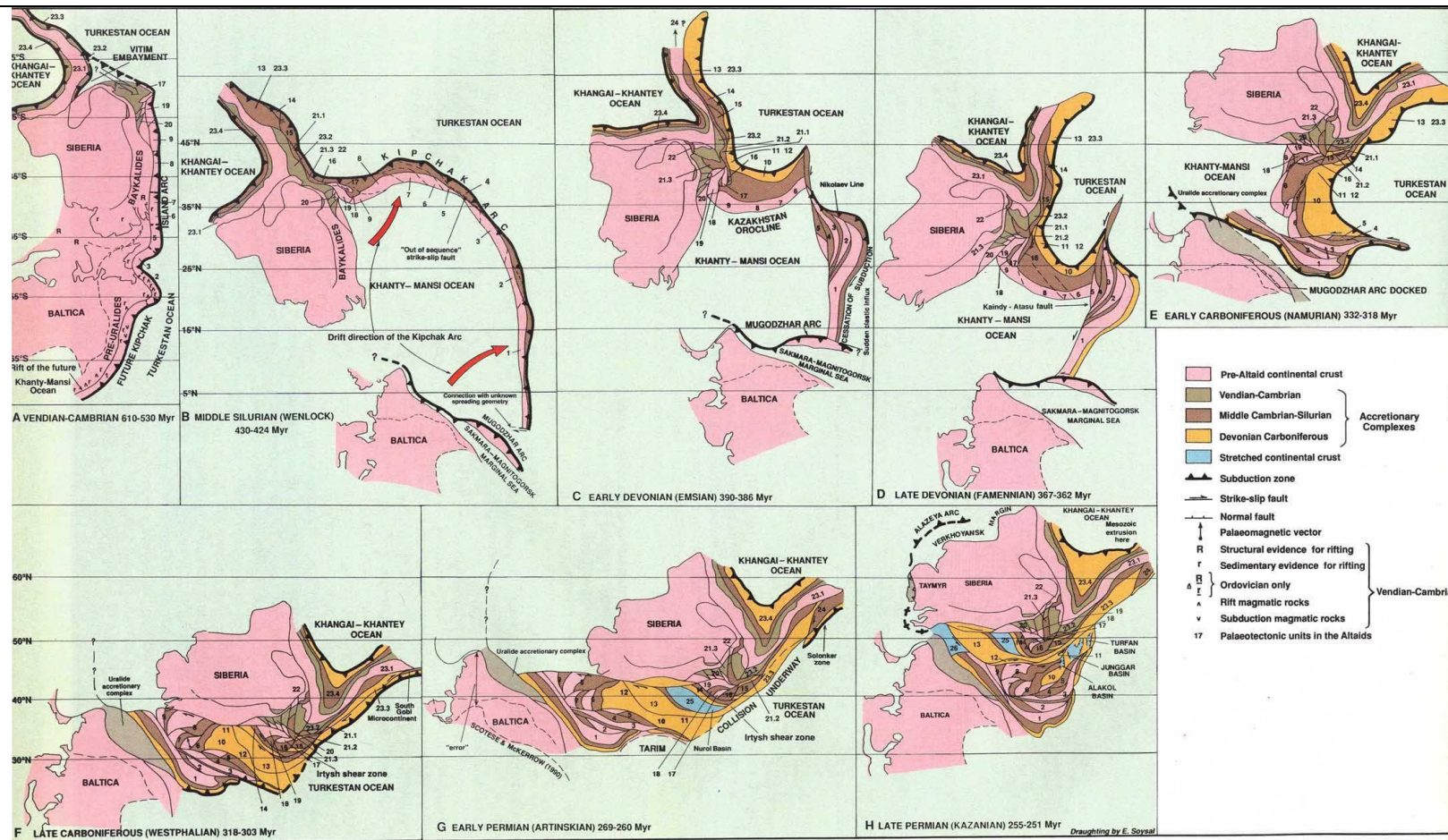


Рисунок 4.1.1. Оригинальный рисунок из работы [Sengor et al., 1993] иллюстрирующий тектоническую эволюцию ЦАПП в палеозое с позиций гипотезы ШНБ.

Цели исследования. В контексте тестирования «островодужной» модели формирования Центрально-Азиатского подвижного пояса (гипотезы ШНБ) основными целями исследования являются:

I. Реконструкция взаимного положения и характера дрейфа Сибирской и Восточно-Европейской платформ в раннепалеозойское время по палеомагнитным данным.

II. Выявление следов эволюции гипотетической дуги Кипчак в пределах складчатого пояса и на платформенных окраинах на основе геохронологических данных по возрастам обломочных цирконов.

Задачи исследования. Задачи в рамках палеомагнитной части (I) тестирования гипотезы ШНБ:

1) Анализ опубликованных палеомагнитных данных по Сибири и Балтике для выявления наиболее полно охарактеризованных палеомагнитными определениями уровней в объеме раннего палеозоя. Выявление из них изохронных (одновозрастных) уровней по Сибири и Балтике для последующего детального анализа.

2) Выявление генеральных тенденций (трендов) в смещении палеомагнитных полюсов Сибири и Балтики в объеме анализируемых изохронных выборок.

3) Оценка степени соответствия трендов смещения палеомагнитных полюсов Сибири и Балтики и возможности их сопоставления (синтеза) в рамках единой модели.

4) Синтез изохронных палеомагнитных определений по Сибири и Балтике: (а) разработка комбинированной (общей) кривой кажущейся миграции полюса, (б) реконструкция взаимного положения Сибири и Балтики, (в) построение серии палеогеографических реконструкций и (г) оценка кинематики дрейфа платформ для анализируемого временного интервала.

5) Оценка достоверности реконструкций по независимым геологическим данным.

Задачи в рамках геохронологической части (II) тестирования гипотезы ШНБ:

Анализ опубликованных геохронологических данных по возрастам детритовых цирконов из осадочных пород раннего палеозоя окраин платформ и структур Центрально-Азиатского подвижного пояса, для:

1) Выявления в раннепалеозойских осадочных толщах енисейской и уральской окраин Сибири и Балтики цирконов с возрастными близкими ко времени осадконакопления, что свидетельствовало бы о проявлениях синхронной седиментации островодужного или/и рифтового аэрального вулканизма.

2) Выявления в пределах ЦАПП раннепалеозойских осадочных толщ, содержащих цирконы с возрастами характерными для пород кристаллического фундамента Сибири и Балтики, в комплексе с вендско-раннепалеозойскими (островодужными) популяциями, что свидетельствовало бы о «сибирском» или «балтийском» происхождении фундамента островных дуг – источников сноса кластического материала.

Методы и объекты исследования. Для тестирования модели ШНБ был выполнен анализ опубликованных палеомагнитных данных по ордовику Сибири и Балтики – единственному «изохронному» уровню раннего палеозоя, по которому накоплен значительный массив качественных палеомагнитных определений для обоих кратонов. Палеомагнитные данные по ордовику Балтики включают 17 определений по разрезам Ленинградской области, Эстонии, Швеции и Норвегии, для Сибири в анализе было использовано 15 определений по северо-западу и западу платформы. Возраст всех объектов, по которым были получены палеомагнитные определения, вошедшие в анализ, был ревизован в соответствии с международной стратиграфической шкалой 2016г.

Палеомагнитные данные были использованы для реконструкции взаимного положения, кинематики и палеогеографической позиции Сибири и Балтики в ордовикское время и для построения комбинированной кривой кажущейся миграции полюса. Достоверность палеогеографической реконструкции была оценена с привлечением геологических данных, характеризующих палеоклимат и обстановки седиментации в ордовикских бассейнах платформ. Также для тестирования модели ШНБ был выполнен анализ опубликованных геохронологических данных по детритовым цирконам из кембро-ордовикских осадочных пород западной окраины Сибири, восточной окраины Балтики и структур ЦАПП. В частности, принципиально важные в контексте проблемы геохронологические данные получены по объектам, представляющим:

1) Уральскую часть ЦАПП (Восточно-Уральское поднятие и Сакмарская зона – терригенные толщи нижнего-среднего ордовика: маячная, рымнинская и кидрясовская свиты) [Кузнецов и др., 2016]

2) Кембро-ордовикские толщи Полярного и Приполярного Урала – манитанырдская серия, погурейская и саблегорская свиты Западно-Уральской зоны [Соболева и др., 2012; Никулова и др., 2016]

3) Верхнедокембрийские и верхнекембрийские толщи енисейской окраины Сибирской платформы – вороговская серия и эвенкийская свита Енисейского Кряжа [Летникова и др., 2016; Прияткина и др., 2016].

4) Метаосадочные раннепалеозойские комплексы Монголии [Rojas-Agramonte et al., 2011; Kröner et al., 2011].

В контексте тестирования гипотезы ШНБ, рассматриваемый комплекс палеомагнитных и геохронологических данных позволяет дать ответ на три вопроса: (1) каково было взаимное положение Сибири и Балтики в раннем палеозое и как эта конфигурация согласуется с базовой реконструкцией модели ШНБ? (2) имеются ли в структурах Центрально-Азиатского пояса свидетельства «следы» древней континентальной коры Сибири и Балтики, которые могли бы служить фундаментом для гипотетической дуги Кипчак? и (3) существуют ли следы венд-кембрийского рифтогенеза и аэрального (островодужного) вулканизма на окраинах платформ, которые могут быть свидетельствами зарождения и эволюции дуги Кипчак?

Результаты и выводы. В рамках настоящего отчета мы не будем в деталях рассматривать всю аналитическую часть и результаты проведенного исследования, а сформулируем их в тезисной форме:

1) Палеомагнитные данные по Сибирской платформе и Балтике характеризуются схожими тенденциями смещения палеомагнитных полюсов в течение ордовикского времени. Сходство трендов смещения полюсов позволяет предполагать, что рассматриваемые континентальные блоки в ордовике могли испытывать согласованные перемещения, то есть входить в состав общей литосферной плиты. Наилучшее совмещение палеомагнитных полюсов ордовика Сибири и Балтики достигается путем их поворота вокруг полюса Эйлера, располагающегося в пределах акватории Карского моря. Как было показано нами ранее [Шацилло, 2015а], аналогичный полюс Эйлера описывает пермский разворот Сибири относительно Балтики в ходе амальгамации северной части Пангеи (рис 4.1.2.), т.е. формирования Северной Евразии в ее раннемезозойской конфигурации, близкой к современной. Это позволяет предполагать, что Сибирь и Балтика в течение *ВСЕГО* палеозоя, а возможно и с позднего венда [Шацилло, 2015б], представляли единый континентальный «агломерат», конфигурация которого определялась относительным разворотом кратонов вокруг одного и того же полюса вращения. Если сделанное заключение верно («противопоказаний» к нему обнаружено не было), то палеомагнитные данные по палеозою Сибири и Балтики, с введением соответствующих тектонических поправок, могут совместно использоваться для построения палеореконструкций и разработки комбинированной (общей) кривой кажущейся миграции полюса.

2) Выполненная на основе комбинированного набора палеомагнитных данных по ордовика Сибири и Балтики палеотектоническая реконструкция (рис 4.1.3.) показывает: а) в течение ордовика северная (таймырская) окраина Сибири была обращена к северо-восточной (тиманской) окраине Балтики, при этом их разделяло пространство, шириной около 1600 км; б) пространство между Сибирью и Балтикой занимал континент Арктида, чему, в частности, не противоречат палеомагнитные данные по ордовика Карского блока (архипелаг Северная Земля) [Metelkin et al., 2005], входящего в его состав; в) поскольку коллизия Арктиды и Балтики оценивается поздним вендом – ранним кембрием [Kuznetsov et al., 2014], а взаимное положение Сибири и Балтики в позднем венде предполагается аналогичным ордовикскому [Шацилло, 2015б и ссылки там], все эти три блока могут быть объединены в конце венда – начале палеозоя в составе композитного континента Сибирь-Арктида-Балтика (САБ).

3) Континент САБ был вытянут вдоль меридиана, и располагался в субполярных – экваториальных климатических поясах южного полушария, при этом балтийский фрагмент САБ занимал средне-высокоширотные области, а сибирский фрагмент - низкоширотные. В течение ордовика САБ испытывал северный дрейф со скоростью ~4см/год в раннем-среднем ордовике, в позднем ордовике скорость дрейфа возросла вдвое. Позднеордовикскому скачку скоростей широтного дрейфа САБ предшествовало изменение направления его вращения – от вращения по часовой стрелке (ранний ордовик) к вращению против часовой стрелки. Набор фаций и литологические особенности пород, накапливавшихся в ордовикских бассейнах Сибири и Балтики, согласуются с широтным дрейфом балтийского фрагмента САБ из высоких широт южного полушария в низкие, а также с низкоширотным положением сибирского фрагмента САБ, по крайней мере, в раннем – начале среднего ордовика. Появление во второй половине среднего ордовика в сибирских разрезах холодноводных карбонатов может быть, по-видимому, объяснено появлением холодных течений или апвеллингом, что требует дальнейшего осмысления. Не исключено, что изменение системы течений в мировом океане в среднем ордовике могло быть связано с глобальной тектонической перестройкой всего ансамбля литосферных плит и изменением характера их движения, что, в свою очередь, могло быть предвестником крупнейшего тектонического события среднего палеозоя – коллизии Балтики (балтийской части САБ) и Лаврентии. Возможно, свидетельства этого мы видим в изменении характера дрейфа САБ в середине ордовикского времени.

4) Анализ геохронологических данных по детритовым цирконам из кемброордовикских толщ уральской окраины Балтики, енисейской окраины Сибири и некоторых объектов Центрально-Азитского подвижного пояса допускает, что в пределах структур

ЦАПП могут содержаться реликты континентальной коры Арктиды и возможно Сибири или их комбинация. Эти фрагменты САБ могли служить фундаментом для венд-кембрийских островодужных комплексов, слагающих сейчас значительную часть ЦАПП. Вероятно, что обособление этих фрагментов САБ от континентальной части было вызвано венд-кембрийским рифтингом на енисейско-уральской окраине континента. Такое заключение в какой-то степени согласуется с моделью Шенгера-Натальина-Буртмана (Sengör et al., 1993), рассматривающей раннепалеозойскую эволюцию ЦАПП как результат функционирования гигантской островной дуги Кипчак, протягивавшейся вдоль енисейско-уральской окраины Сибири и Балтики и заложившейся на полосе континентальной коры, отделившейся от кратонов в венде-кембрии в результате рифтогенеза. Предлагаемая нами конфигурация САБ в целом согласуется с базовыми позициями модели Шенгера-Натальина-Буртмана, в соответствии с которыми в венде – раннем кембрии Сибирь и Балтика должны были быть обращены друг к другу своими современными северными окраинами. В своих построениях мы не стремимся доказать справедливость модели Шенгера-Натальина-Буртмана, однако, сделанные нами заключения в целом не противоречат рассматриваемой концепции и могут указывать на то, что часть (и возможно значительная) венд-кембрийских островодужных комплексов, представленных сейчас в структуре ЦАПП, заложилась на фрагментах композитного континента Сибирь-Арктида-Балтика, а не на отторженцах Гондваны или Таримского блока, как это предполагается в ряде работ.

Выводы. Синтез палеомагнитных данных по Сибирской и Восточно-Европейской (Балтика) платформам указывает на то, что с раннепалеозойского времени они могли испытывать согласованные перемещения, представляя единый континентальный агломерат, включавший также континент Арктида. На основе палеомагнитных данных выполнена реконструкция взаимного положения Сибири и Балтики в ордовикское время и предложена серия палеогеографических реконструкций, описывающих дрейф композитного континента в этом интервале времени. Литолого-фациальный анализ обстановок осадконакопления ордовикских бассейнов Сибирской и Восточно-Европейской платформ и индикаторы палеоклимата не противоречат предложенной конфигурации и палеогеографическому положению композитного континента. Предложенные реконструкции, а также данные по возрастам детритовых цирконов из раннепалеозойских пород платформенных окраин и некоторых объектов Центрально-Азиатского пояса находятся в удовлетворительном согласовании с гипотезой Шенгера-Натальина-Буртмана и могут рассматриваться как доводы в пользу этой модели.

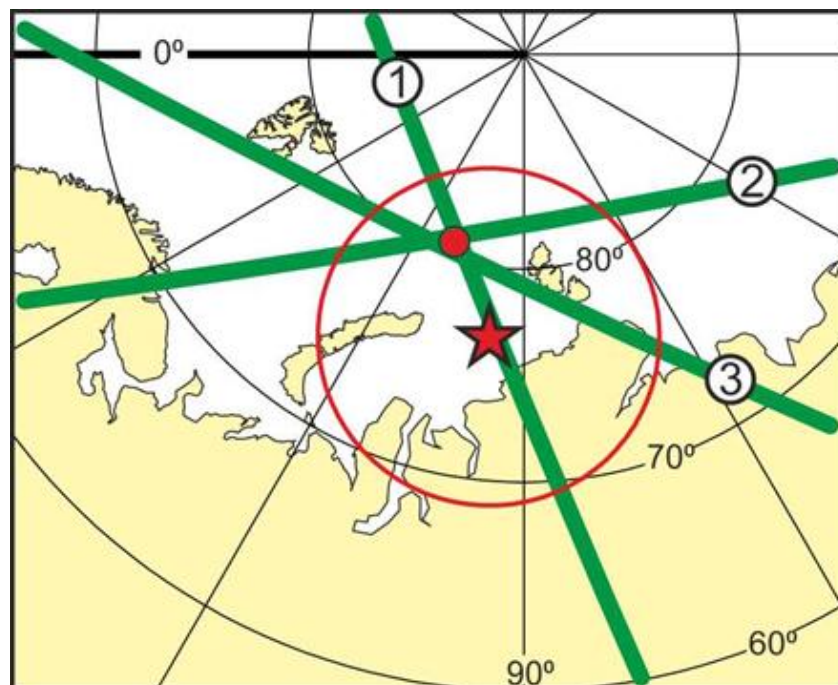


Рисунок 4.1.2. Расчет полюса вращения (Эйлера) для наилучшего сопоставления палеомагнитных данных по ордовика Сибири и Балтики и его сравнение полюсом вращения, описывающим пермский поворот платформ при формировании Северной Евразии (Пангеи).

Жирные линии - большие круги, описывающие возможные положения полюсов Эйлера для совмещения палеомагнитных данных по Сибири и Балтике: 1- для нормалей к большим кругам, аппроксимирующим тренд смещения средне- позднеордовикских полюсов, 2- для осредненных среднеордовикских полюсов, 3- для раннепермских полюсов (Шацилло, 2015а). Звездочка и соответствующий ей круг (доверия) - полюс Эйлера, рассчитанный по региональным структурным данным (Шацилло, 2015а) и описывающий пермское относительное вращение Сибири и Балтики при формировании Пангеи. Кружок - рассчитанный полюс Эйлера, используемый для совмещения палеомагнитных данных по ордовика Сибири и Балтики, построения комбинированной кривой КМП и палеореконструкции.

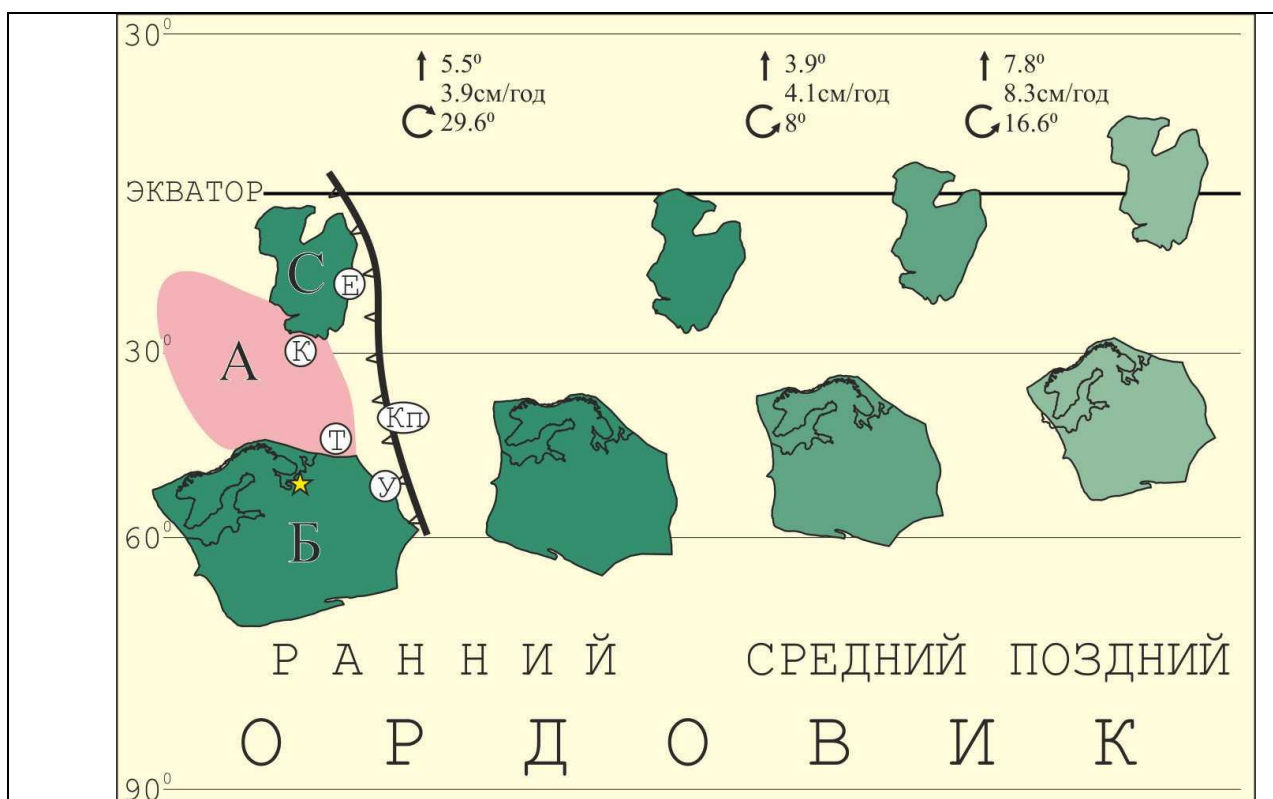


Рисунок 4.1.3. Взаимное положение Сибири и Балтики в рамках композитного континента САБ (Сибирь-Арктида-Балтика) его палеогеографическое положение и характер дрейфа в ордовикское время.

Пояснения: С- Сибирь, А- Арктида (контур условный), Б- Балтика, У- уральская окраина, Е- енисейская окраина, Кп- гипотетическая дуга Кипчак. Структуры Арктиды: Т- ороген Протоуралид-Тиманид, К- Карский блок. Круговые стрелки и соответствующие им цифры- направление и масштабы вращения (в градусах). Вертикальные стрелки и соответствующие им цифры – направление широтного дрейфа, масштаб перемещения (в градусах), скорость перемещения (см/год). Звездочка – референтная точка (г.Архангельск), для которой рассчитаны кинематические параметры континента САБ.

4.2. Синтез палеомагнитных, геохронологических, геохимических, седиментологических и палеонтологических данных по венд-кембрийским разрезам севера Енисейского края. Разработка модели тектонического развития региона.

Актуальность. Вплоть до настоящего времени принято считать, что неопротерозойские комплексы и сложенные ими структуры северной части Енисейского края (Заангарья) – это, в основном, реликты неопротерозойского аккреционно-коллизийного складчатого пояса, сформированного на западной окраине Сибирской платформы. При этом в работах разных исследователей по-разному интерпретировано строение Заангарья и реконструирована его позднекембрийская эволюция. Основные различия заключаются в подходе к пониманию роли и значения тектономагматических событий, одновозрастных гренвилевскому (свеконорвежскому) орогенезу, проявленному во многих регионах мира. Так, в работах [Лиханов и др., 2014 и ссылки там] обосновывается выделение гренвилевских тектономагматических событий в истории Заангарья. В противоположность этому, в работах [Верниковский и др., 2016 и ссылки там] проявление гренвилевских тектономагматических событий в Заангарье полностью отрицается.

Несмотря на эти очевидные различия в подходах, в настоящее время среди исследователей существует консенсус в отношении понимания тектонической зональности Енисейского края. В его строении выделяют пять разнородных блоков: Восточно-Ангарский, Центральнo-Ангарский, Исаковский, Ангаро-Канский и Предивинский террейны. Первые три из них расположены в северной части Енисейского края. Самый восточный из этих блоков – Восточно-Ангарский блок (**ВАБ**) сложен позднекембрийскими глинисто-терригенными и карбонатными породами. В большинстве работ он трактуется как фрагмент позднекембрийской пассивной окраины Сибири [Верниковский и др., 2016; Лиханов и др., 2014 и ссылки там]. Структуры **ВАБ** отделены от Центральнo-Ангарского блока (**ЦАБ**) Ишимбинской (или Татарско-Ишимбинской) зоной разломов. В строении **ЦАБ** (так же, как и в строении **ВАБ**) участвуют позднекембрийские глинисто-терригенные и карбонатные породы [Хоментовский, 2007], а на западе – вулканогенные и вулканогенно-осадочные образования [Ножкин и др., 2012]. Кроме этого, в строении **ЦАБ** значительную роль играют гранитометаморфические образования [Лиханов и др., 2010, 2014 и ссылки там]. На самом севере Заангарья к западу от **ЦАБ** расположена Исаковская островодужно-офиолитовая зона (террейн) [Kuzmichev, Sklyarov, 2016 и ссылки там]. В бо-

лее южных районах Заангарья восточные части **ЦАБ** перекрыты мезозойско-кайнозойскими толщами, слагающими чехол юго-восточной части Западносибирского осадочного бассейна [Хераскова и др., 2009; Гражданкин и др., 2015].

Как отмечалось, в отношении **ЦАБ** существуют два существенно различных подхода к пониманию его тектонической природы и первичной тектонической принадлежности. Так, в работах [Лиханов и др., 2010, 2012, 2014 и ссылки там] **ЦАБ** и **ВАБ** – рассматриваются как элементы позднедокембрийской окраины Сибири, а разделяющая их Татарско-Ишимбинская зона трактуется как реликт среднерифейского Рыбинско-Панимбинского вулканического пояса, сформированного при рифтогенезе сибирской окраины.

В противоположность этому в работах [Верниковский и др., 2016 и ссылки там] **ЦАБ** понимается как террейн, чужеродный по отношению к сопряженному с ним в современной структуре краю Сибирской платформы. При этом граница между **ЦАБ** и **ВАБ** представляется как офиолитовая сутура. Согласно этим представлениям по этой сутуре в середине позднего рифея (на временном рубеже ~ 700-600 млн лет) были совмещены находящиеся в положении автохтона комплексы и структуры пассивной окраины Сибирской платформы (**ВАБ**) и находящиеся в положении аллохтона комплексы и структуры **ЦАБ** – террейна, чужеродного по отношению к Сибирской платформе. При этом верхнедокембрийские толщи **ЦАБ** и **ВАБ** считаются разнородными. В соответствии с этими представлениями, надвигание («аккретирование») **ЦАБ** на Сибирский кратон привело к тому, что пассивная континентальная окраина на западе Сибири была трансформирована в активную. Практически одновременно с формированием островных дуг и их надвиганием на структуры **ЦАБ**, обдукцией офиолитов Татарско-Ишимбинской зоны и аккретированием к Сибирской платформе самого **ЦАБ** (террейна), в пределах той части Сибирской платформы, где сейчас расположен Енисейский кряж, произошел окраинно-континентальный рифтогенез с образованием щелочных базальтоидов, трахитов, сиенитов и гранитов А-типа [Верниковский, Верниковская, 2006; Ножкин и др., 2007, 2012; Верниковский и др., 2008]. Все это объясняется субдукцией под континент океанской плиты и формированием нового щелочного магматического источника, при достижении ею астеносферы. В среднем неопротерозое (в конце позднего рифея) – 700-650 млн лет назад, вдоль всего Енисейского кряжа и Восточного Саяна до оз. Байкал [Ярмолук и др., 2005] вместе со щелочным магматизмом происходило формирование окраинно-континентальных рифтогенных прогибов, фиксирующих обстановку растяжения [Sovetov et al., 2007] и, в том числе, Чапско-Тейского прогиба, реликты которого расположены на северо-востоке Заангарской части Енисейского кряжа. При этом в некоторых работах выполнение этого прогиба (чингасанская и чапская серии, воз-

раст которых считается позднерифейским [Хоментовский, 2007; Ножкин и др., 2007] и вендским [Советов, Благовидов, 2005]) рассматривается как моласса неопротерозойского орогена Енисейского кряжа [Хераскова и др. 2009].

Очевидно, что для создания адекватной внутренне непротиворечивой модели тектонического развития западной окраины Сибирской платформы и сопредельных структур Центрально-Азиатского покровно-складчатого пояса (ЦАПСП) необходимо определиться с: (1) пониманием первичного характера границы между **ВАБ** и **ЦАБ** Заангарья; (2) корреляцией верхнедокембрийских толщ, распространенных по обе стороны от этой границы; (3) первичной тектонической природой **ЦАБ** (его родственности или чужеродности по отношению к Сибирской платформе); (4) возрастом и формационной принадлежностью комплексов, считающихся молассами неопротерозойского орогена Енисейского кряжа.

Эти вопросы были рассмотрены нами в ходе работ по Проекту.

Цель исследований – создание адекватной внутренне непротиворечивой модели тектонического развития западной окраины Сибири и сопредельных структур ЦАПСП, учитывающей всю совокупность имеющихся и вновь полученных палеомагнитных, геохронологических, геохимических, седиментологических палеонтологических и структурно-геологических данных по позднедокембрийским и кембрийским комплексам севера Енисейского кряжа.

Основные задачи:

1. Выявление характера Ишимбинской (или Татарско-Ишимбинской) зоны – границы между **ВАБ** (Восточно-Ангарским) и **ЦАБ** (Центрально-Ангарским) (структурно-формационными зонами или террейнами) северной Заангарской части Енисейского кряжа (Заангарья).
2. Тестирование (уточнение) корреляций верхнедокембрийских толщ, распространенных по обе стороны от Ишимбинской зоны.
3. Определение первичной тектонической природы **ЦАБ** (его родственности или чужеродности по отношению к Сибирской платформе);
4. Определение возраста и формационной принадлежности комплексов, считающихся молассами неопротерозойского орогена Енисейского кряжа и их палеомагнитное опробование.

Основным объектом исследований были позднедокембрийские и кембрийские комплексы Заангарской части Енисейского кряжа и сложенные ими структуры.

При проведении исследований были использованы следующие *методы и подходы*.

1. Палеомагнитные и магнитостратиграфические исследования; 2. Седиментологическое и литолого-геохимическое изучение верхнедокембрийских и нижнепалеозойских толщ Заангарской части Енисейского кряжа; 3. Геохронологическое и изотопно-геохимическое изучение детритных цирконов (*dZr*) из верхнедокембрийских и нижнепалеозойских толщ Заангарской части Енисейского кряжа; 4. Структурно-геологическое изучение позднедокембрийских и нижнепалеозойских комплексов Заангарской части Енисейского кряжа; 5. Комплексный тектонический и геодинамический анализ строения и истории тектонического развития западной части Сибирской платформы в конце докембрия и начале палеозоя на основе результатов изучения позднедокембрийских и раннепалеозойских комплексов северной (Заангарской) части Енисейского кряжа и прилегающих к ней частей Центрально-Азиатского покровно-складчатого пояса.

Основные результаты исследований

Палеомагнетизм и магнитостратиграфия вендских-нижнепалеозойских отложений Енисейского кряжа.

Получен комплекс палеомагнитных и магнитостратиграфических данных по лопатинской свите [Шацило и др., 2015] – нижних горизонтов чингасанской серии, участвующей в выполнении Чапско-Тейского прогиба. Эти данные в сочетании с анализом полученных нами стратиграфических, биостратиграфических [Кузнецов, Шацило, 2013], литолого-седиментологических [Рудько и др., 2015], геохронологических, изотопно-геохимических данных [Кузнецов и др., 2017], позволили, в противоположность существующим представлениям об отнесении лопатинской свиты к верхнему рифею, показать, что лопатинская свита является верхневендской и представляет собой стратиграфические эквиваленты котлинского горизонта Восточно-Европейской платформы. Для заверки полученных палеомагнитных и магнитостратиграфических данных в полевой сезон 2016г. нами был изучен дополнительный разрез лопатинской свиты по р.Средняя Нойба – результаты по этой коллекции будут получены к лету 2017г.

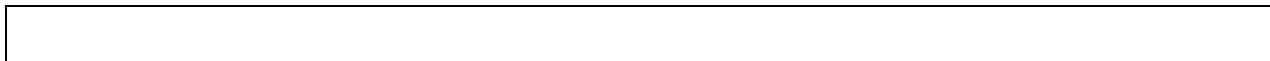
В 2016 г. нами получены первые палеомагнитные данные по подъемской свите, слагающей нижние уровни разреза чапской серии, широко распространенной на севере Заангарской части Енисейского Кряжа. Подъемская свита была опробована в четырех береговых обнажениях р. Тея ниже пос. Суворовский, всего отобрано 93 ориентированных образца. К моменту подготовки отчета вся палеомагнитная коллекция

подъёмской свиты прошла лабораторную обработку (детальная температурная магнитная чистка), была выполнена предварительная интерпретация данных лабораторных измерений – компонентный анализ результатов температурной магнитной чистки образцов.

В целом, результаты проведенных нами исследований показали, что породы подъёмской свиты характеризуются удовлетворительным качеством палеомагнитной записи. В тоже время, анализ векторных распределений высокотемпературной компоненты намагниченности (рис 4.2.1.), выделенной в породах подъёмской свиты показал, что намагниченность, содержащаяся в изученных породах, по всей вероятности является суперпозицией «смесью» первичной намагниченности, близкой ко времени накопления пород и метахронной современной намагниченности. В связи с незначительной разницей в элементах залегания в изученных разрезах подъёмской свиты тесты складки дают неопределенный результат, при исключении тех или иных векторов из выборки намагниченность может интерпретироваться и как доскладчатая и как послескладчатая.

Эти факты не позволяют уверенно интерпретировать полученный результат для решения тектонических задач и задач магнитостратиграфии – для этого необходимы дополнительные исследования и отбор палеомагнитных коллекций из других разрезов.

С другой стороны, даже на текущем уровне исследования, сравнение палеомагнитных направлений подъёмской свиты с известными направлениями венда-раннего кембрия Енисейского кряжа и Бирюсинского Присяянья [Шацилло и др., 2015; Shatsillo et al., 2006] указывает, что часть изученных образцов содержит направления аналогичные таковым в породах верхней части тасеевской и оселковой серий (чистяковская, мошакановская и айсинская свиты) (рис 4.2.1.).



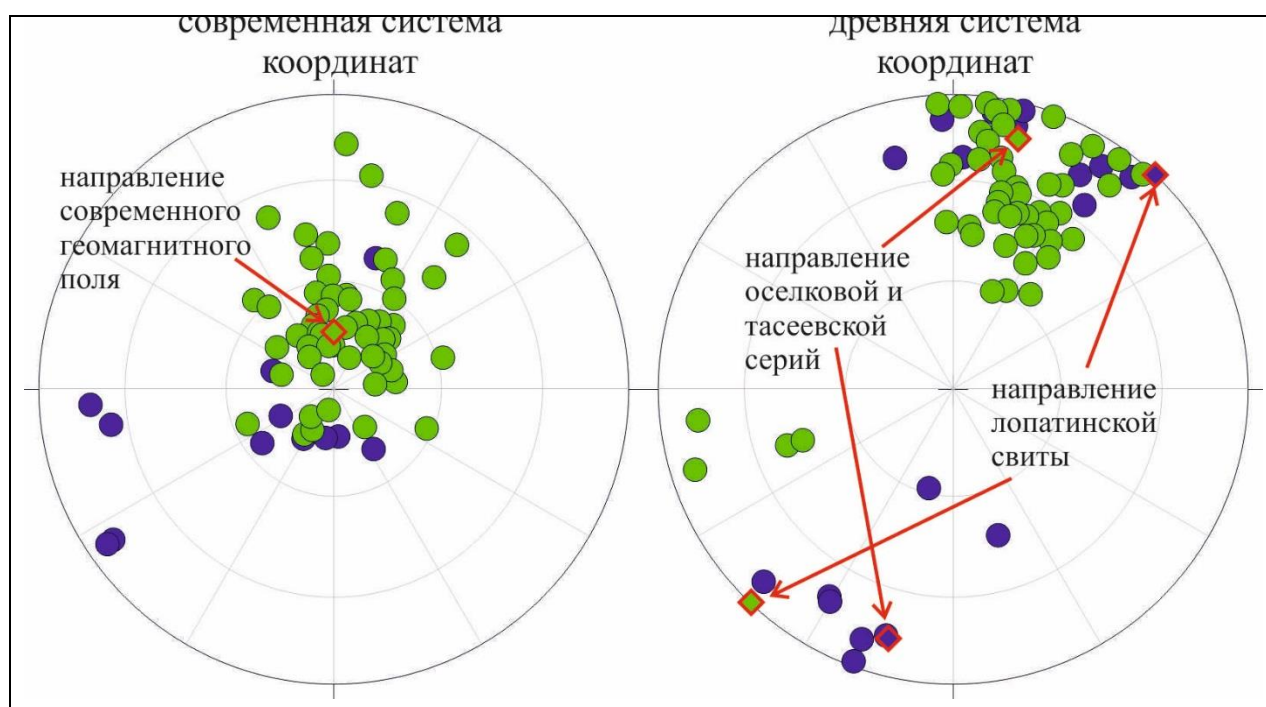


Рисунок 4.2.1. Распределение векторов высокотемпературной компоненты намагниченности в породах подъемской свиты. Пояснения: зеленая/синяя заливка – проекция на нижнюю/верхнюю полусферу; кружки – единичные направления высокотемпературных компонент в породах подъемской свиты; ромбики – направления в породах терминального неопротерозоя юго-запада Сибирской платформы [Шацилло и др., 2015; Shatsillo et al., 2006], направление современного геомагнитного поля района работ.

Часть направлений подъемской свиты также близка к палеомагнитному направлению лопатинской свиты р.Тея. Очевидно, что такие совпадения не являются «случайными» и означают, что породы подъемской свиты имеют возраст близкий, как к толщам, слагающим верхи тасеевской и оселковой серий юга Енисейского кряжа и Присяня, так и к лопатинской свите чингасанской серии изученного региона, занимающих пограничное венд-кембрийское положение. Близкие палеомагнитные направления содержатся и в немчанской свите р.Чапа (неопубликованные авторские данные), залегающей на подъемской свите и представляющей верхнюю часть чапской серии.

Таким образом, сходство палеомагнитных направлений, полученных по породам перечисленных стратиграфических подразделений, является довольно сильным аргументом в пользу близости их возраста. Для проверки этой гипотезы летом 2015 г. нами была отобрана палеомагнитная коллекция из пород алешинской свиты из разрезов р. Нижняя Теря (крайний юг Заангарской части Енисейского кряжа), представляющей

основание тасеевской серии и предположительно являющейся аналогом лопатинской свиты севера Енисейского кряжа. К сожалению, наша попытка получения палеомагнитных данных по алешинской свите р. Нижняя Теря не увенчалась успехом, поскольку изученные породы не несли интерпретируемый палеомагнитный сигнал.

По результатам исследований, проведенных по разделу «Палеомагнитное и магнитостратиграфическое изучение вендско-нижнепалеозойских отложений Енисейского кряжа» сделаны следующие основные выводы.

1. Сходство палеомагнитных полюсов подъемской свиты чапской серии, верхов тасеевской и оселковой серий (распространенных, соответственно, в бассейне нижнего течения р. Ангара и в пределах Бирюсинского Присянья) указывает на одновозрастность всех этих стратиграфических подразделений.

2. В свете полученных данных пока остается открытым вопрос о соответствии в полном объеме чапской и чингасанской серий севера Заангарской части Енисейского Кряжа и тасеевской серии бассейна нижнего течения р. Ангара и р. Тасеева. Для объективного решения этой проблемы необходимо палеомагнитное опробование дополнительных разрезов основания тасеевской серии (алешинская свита), в частности переизучение ее стратотипического разреза по р. Тасеева.

3. Незначительные отличие полюсов чингасанской и чапской серий севера Заангарской части Енисейского Кряжа (лопатинская и подъёмская свиты, соответственно), а также явное различие магнитостратиграфических особенностей разрезов этих свит, предполагает их некоторую разновозрастность (первые миллионы лет).

4. Синтез новых палеомагнитных данных и имеющихся определений не исключает, что выявленные незначительные отличия полюса лопатинской свиты от полюсов чапской, тасеевской и оселковой серий обусловлены локальным поворотом блока, по которому получен «лопатинский» результат.

Общие выводы по результатам исследований по разделу «Синтез палеомагнитных, геохронологических, геохимических, седиментологических и палеонтологических данных по венд-кембрийским разрезам севера Енисейского кряжа. Разработка модели тектонического развития региона»

Результаты палеомагнитных исследований, проведенных в Заангарской части Енисейского кряжа позволили продемонстрировать сходство палеомагнитных направлений подъемской свиты чапской серии, верхов тасеевской и оселковой серий представляющих удаленные регионы Присянья и Енисейского кряжа. Это указывает на одновозрастность

всех этих стратиграфических подразделений.

Полученные результаты пока не позволяют окончательно решить проблему полного соответствия стратиграфического объема чапской и чингасанской серий севера Заангарской части Енисейского Кряжа, а также тасеевской серии бассейна нижнего течения р. Ангары и р. Тасеева. Незначительное различие полюсов чингасанской и чапской серий (лопатинская и подъемская свиты, соответственно), а также явное различие магнитостратиграфических особенностей разрезов этих свит, допускают незначительные различия в возрасте этих регионально-геологических подразделений. Отсутствие надежных палеомагнитных данных по алешинской свите (базальный уровень разреза тасеевской серии) не позволяет уверенно сопоставлять стратиграфический объем алешинской и лопатинской свит.

Результаты **седиментологических и литолого-геохимических** исследований в Заангарской части Енисейского кряжа показали сходство характера соотношений нижних уровней разреза лопатинской и подъёмской свит, залегающих в основании чингасанской и чапской серий, соответственно, с подстилающими образованиями (рис. 4.2.2.). Это, а также некоторые сходства палеомагнитных характеристик этих свит и однотипность палеонтологических остатков эдиакарского типа, обнаруженных на разных уровнях разреза чингасанской и чапской серий, указывает на их близкий возраст и, скорее всего, на их стратиграфическое соответствие котлинскому горизонту верхнего венда Восточно-Европейской платформы.

Сходство внутреннего строения, литологического состава и седиментологических характеристик верхнерифейских толщ (горбилокской, удерейской, погоруйской, потоскуйской, шунтарской свит и др.) Восточно- и Центрально-Ангарского блоков Заангарья (рис. 4.2.3.) накладывает существенные ограничения на представления о чужеродности Центрально-Ангарского блока по отношению к Сибири. Об этом же свидетельствуют результаты синтеза Sm/Nd-изотопно-геохимических данных (рис. 4.2.4.) указывающих на кратонный «сибирский» источник протолита для позднедокембрийских гранитов и вулканоплутонических ассоциаций и метапелитов.

Результаты **геохронологического и изотопно-геохимического изучения dZr из верхнедокембрийских и нижнепалеозойских толщ Заангарья** (рис. 4.2.5. – 4.2.8.) дали возможность охарактеризовать источники сноса, эрозионными продуктами которых сложены песчаники этих толщ. В частности, выполнены U/Pb-изотопные датировки (а для лопатинской свиты и изучение

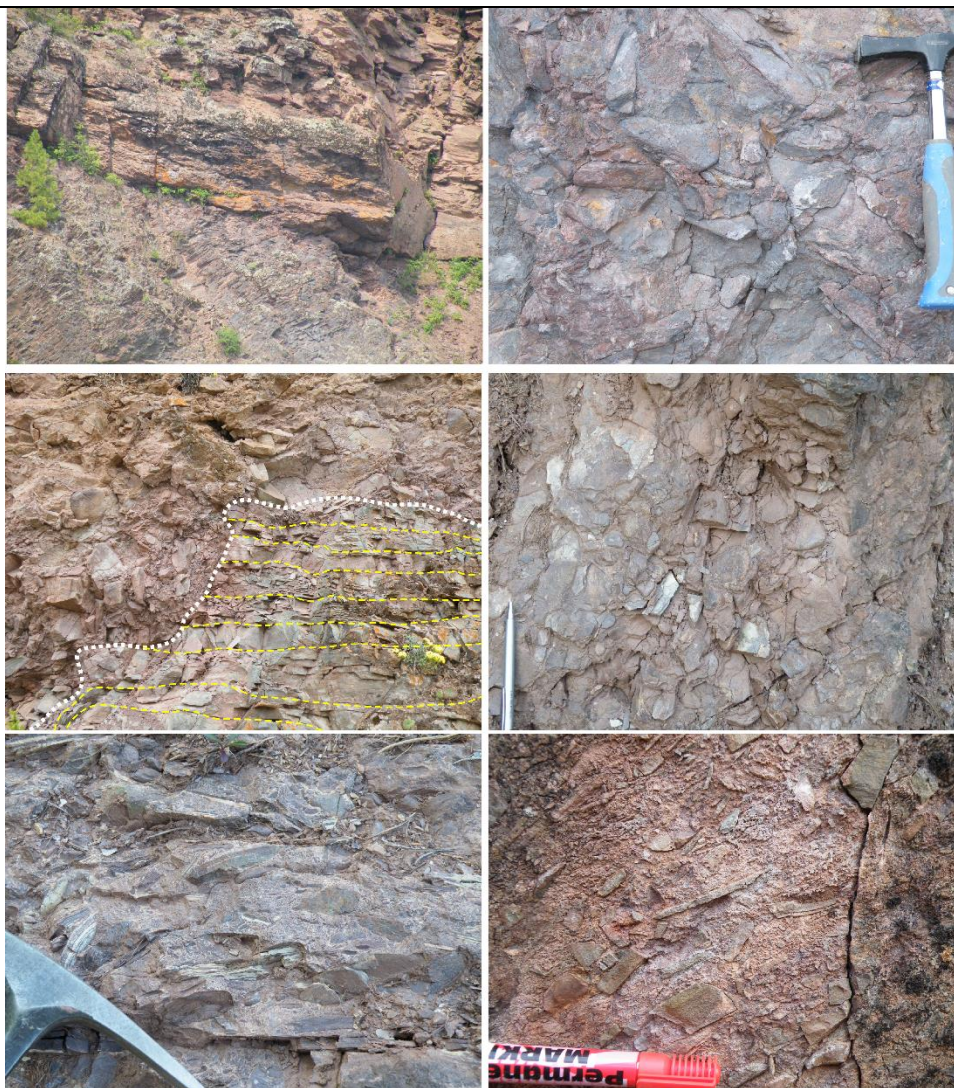


Рисунок 4.2.2. Фотографии базальных горизонтов чингасанской (верхний ряд снимков) и чапской (нижние два ряда снимков) серий. На левом верхнем снимке виден характер взаимоотношений лопатинской свиты, слагающей нижние элементы разреза чингасанской серии и подстилающих сланцев горбилонской свиты. На левом снимке во втором ряду виден характер взаимоотношений подъёмской свиты, слагающей нижние элементы разреза чапской серии части и подстилающих сланцев и метапесчаников погорюйской свиты. На основании сходства характера соотношений нижних уровней разреза чингасанской и чапской серий (лопатинской и подъёмской свит, соответственно) с подстилающими образованиями, сходства единиц и содержащихся в них палеонтологических остатков [Кузнецов, Шаццлло, 2013], мы полагаем, что чингасанская и чапская серии близко разновозрастны и представляют переходные венд-кембрийские уровни.

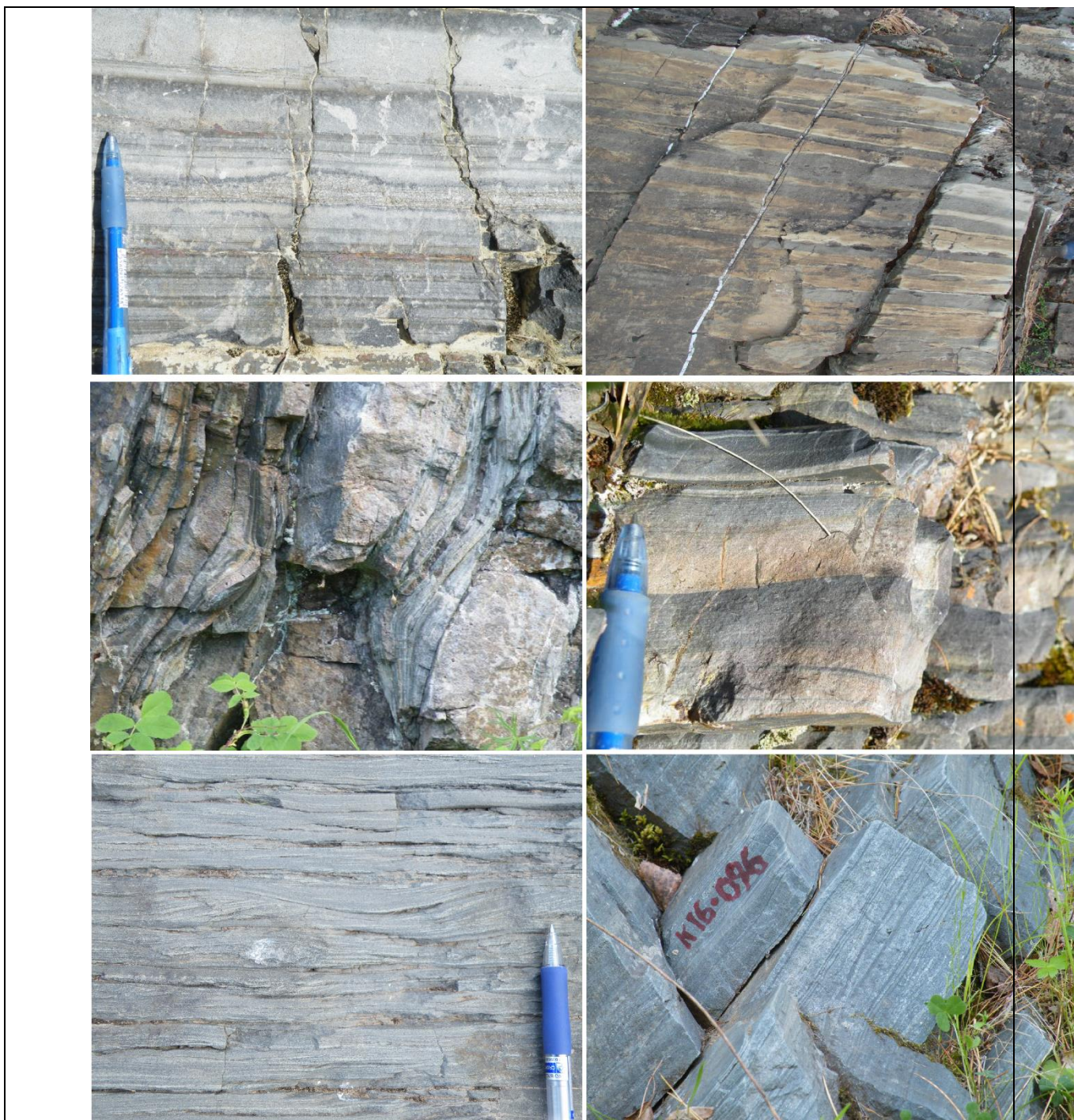


Рисунок 4.2.3. Сравнение пород рифейских толщ, распространенных в Центрально-Ангарском блоке (с лева и) в Восточно-Ангарском блоке (справа). Верхний ряд снимков – свита Карточки; средний ряд снимков – погорюйская свита; нижний ряд снимков – уде-рейская свита.

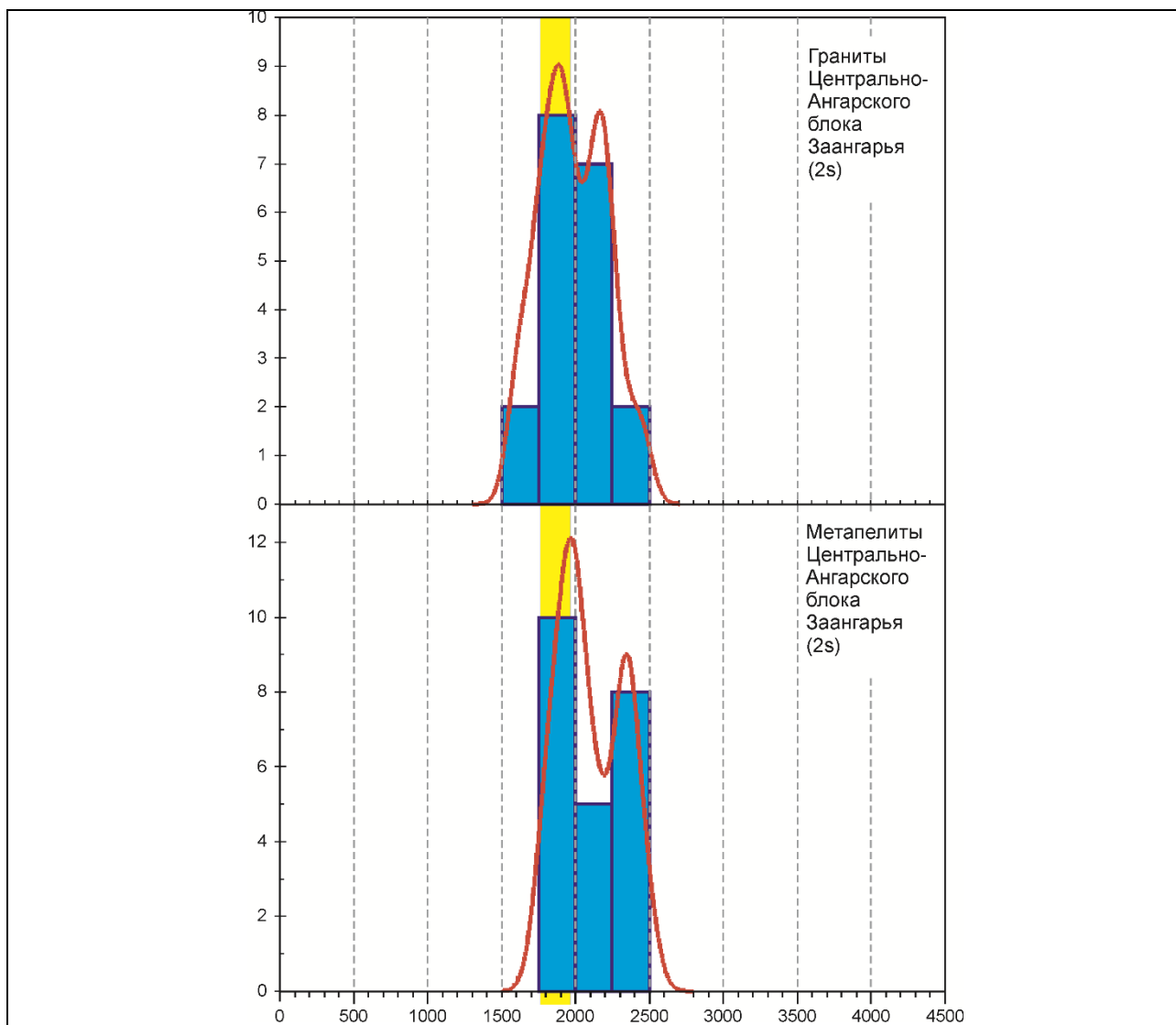


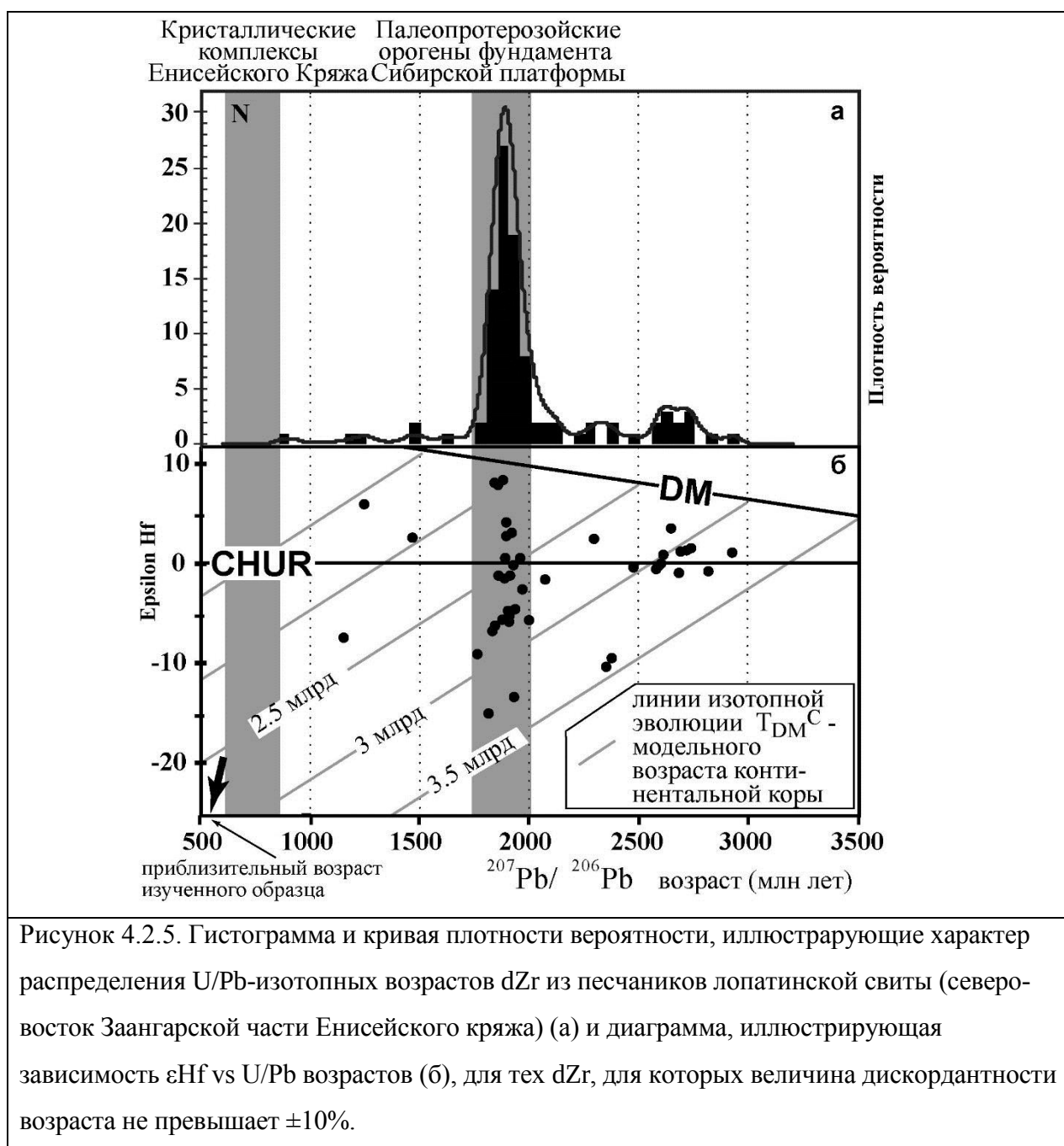
Рисунок 4.2.4. Распределение значений Sm/Nd-модельных возрастов рифейских гранитов Центрально-Ангарского блока Заангарской части Енисейского кряжа (вверху) и Sm/Nd-модельных возрастов пелитов и метапелитов из верхнедокембрийских толщ Центрально-Ангарского блока. Желтая полоса соответствует времени кратонизации Сибирской платформы - возрастному диапазону, интерпретируемому [Розен, 2003] как этап формирования раннепалеопротерозойских коллизионных орогенов, которые сuture-лировали Тунгусский, Анабарский, Оленекский и Алданский протократоны в Сибирский кратон.

Lu/Hf-изотопной системы) dZr из верхневендских песчаников чингасанской и чапской серий, выполняющих Чапско-Тейский прогиб. На этом основании, в частности показано, что верхневендские толщ чингасанской и чапской серий, выполняющих Чапско-Тейский прогиб, образованы продуктами эрозии древних кристаллических комплексов фундамента Сибирской платформы и/или верхнерифейской сухопитской серии или более древних стратифицированных образований их подстилающих. Это противоречит представлениям о том,

что Чапско-Тейский прогиб выполнен молассой неопротерозойского орогена, реликты которого представлены в современной структуре Енисейского кряжа.

Результаты U/Pb-изотопного датирования **dZr** из песчаников погорюйской свиты низов верхнего рифея северной части Восточно-Ангарского блока свидетельствуют о том, что эти песчаники сложены в основном продуктами эрозии кристаллических комплексов фундамента Сибирского кратона, а гренвилльский детрит в этих песчаниках отсутствует. В противоположность этому в песчаниках погорюйской свиты южной части Восточно-Ангарского блока представлены и продукты эрозии фундамента Сибири, и (в подчиненном количестве) гренвилльский детрит. Мы полагаем, что этот гренвилльский сигнал представляет собой результат вдоль берегового разноса детрита из района хр. Сетте-Дабан (юго-восточная складчатая периферии Сибирской платформы - рис. 4.2.8.), где гренвилльский детрит резко доминирует в песчаниках низов верхнего рифея. Качественные различия в возрастных спектрах **dZr** из песчаников погорюйской свиты южной и северной частей Восточно-Ангарского блока Заангарья можно объяснить тем, что части единого позднерифейского осадочного бассейна западной периферии Сибирской платформы располагались по разные стороны от устья Иркинеевско-Чадобецкого сегмента Иркинеевско-Котуйского авлакогена, который препятствовал разносу гренвилльского детрита из района хр. Сетте-Дабан.

Проведенное **структурно-геологическое изучение позднедокембрийских и нижнепалеозойских комплексов** позволило показать, что Татарская (Татарско-Ишимбинская) тектоническая зона, разграничивающая Восточно- и Центральнo-Ангарский блоки Заангарья – это крупная левосдвиговая зона (рис. 4.2.9.), оценить амплитуды смещения по которой пока не представляется возможным.



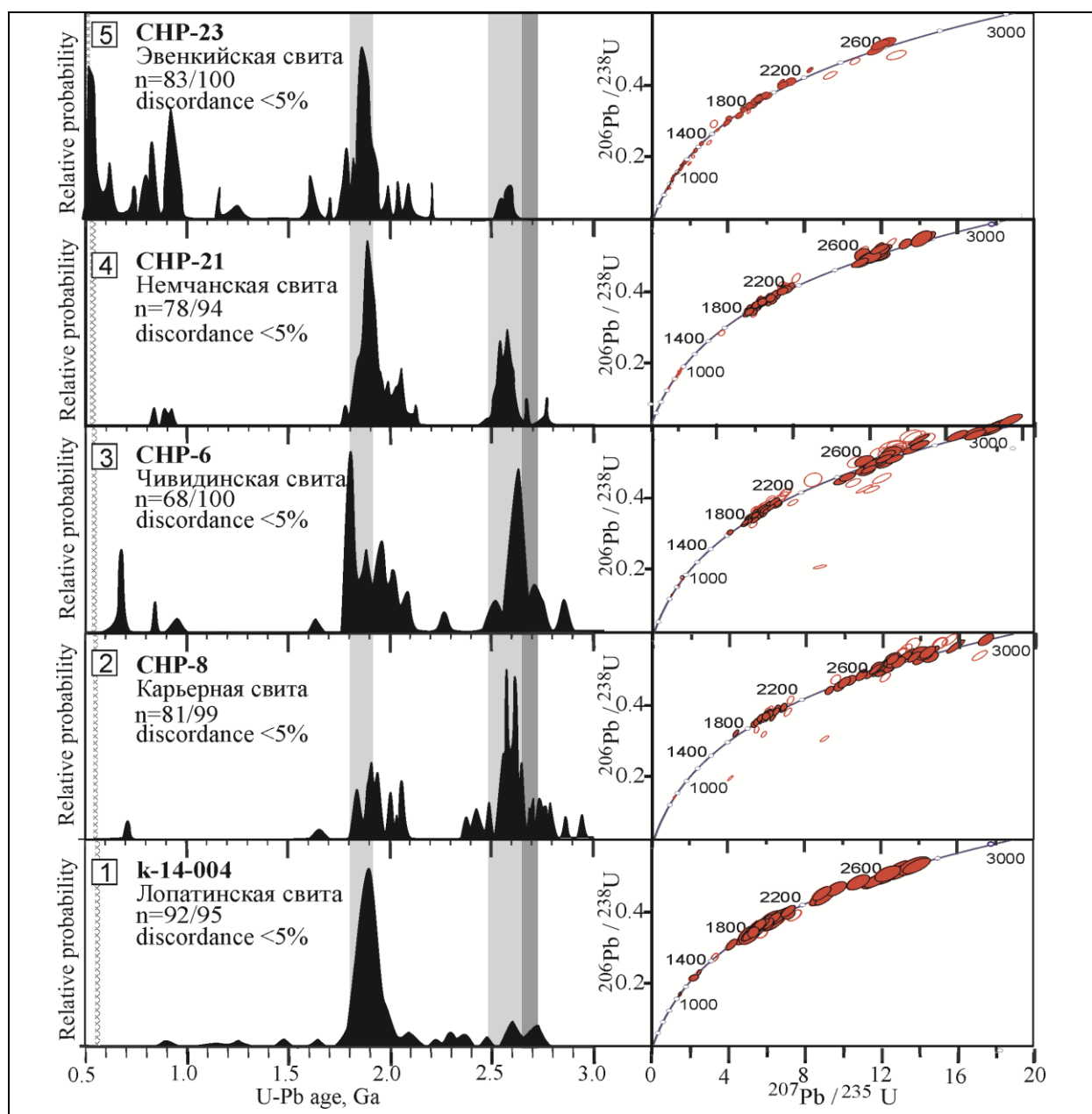


Рисунок 4.2.6. Распределение возрастов детритных цирконов из поздневендских и кембрийских песчаников Енисейского края. 1-3 – чингасанская серия, отнесенная к верхам верхнего венда: 2 – лопатинская свита; 3 – карьерная свита; 3 – чивидинская свита; 5 – немчанская свита (верхи чапской серии), отнесенная к переходным уровням венда и кембрия; 6 – эвенкийская свита верхнего кембрия. Слева – графики плотности относительной вероятности, справа диаграммы с конкордией (диаграммы Аренса – Везерилла)

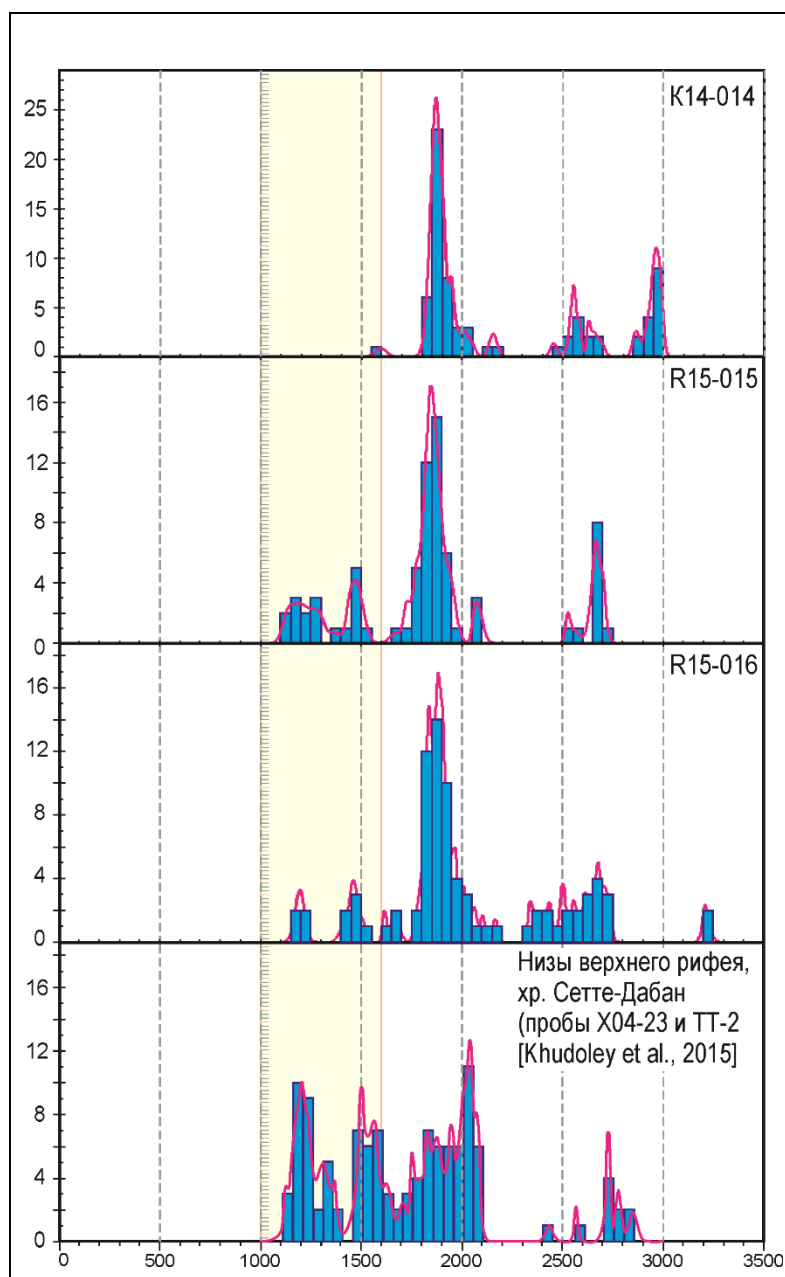
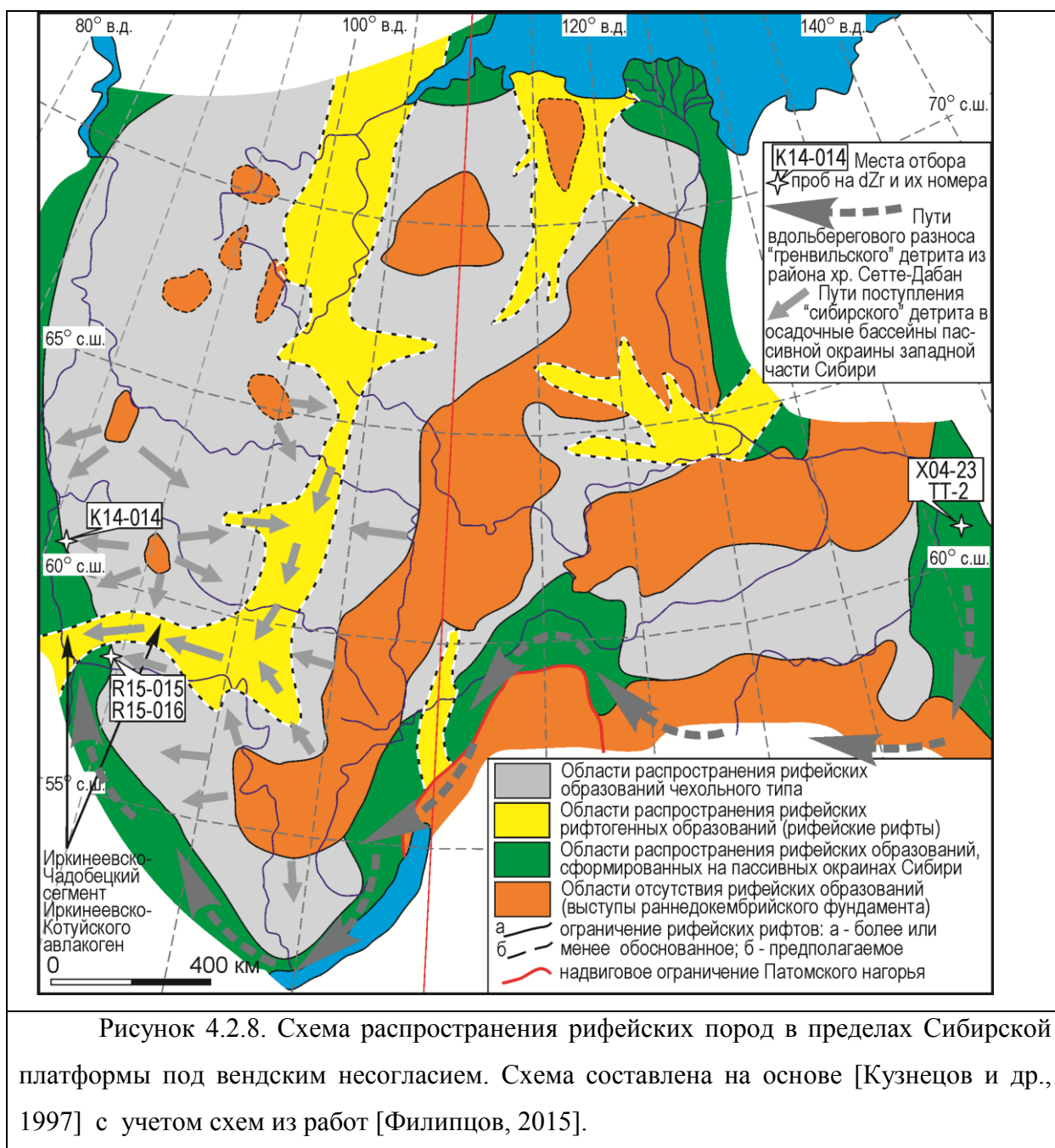


Рисунок 4.2.7. Распределение возрастов детритных цирконов из песчаников погорюйской свиты низов верхнего рифея Восточно-Ангарского блока Заангарской части Енисейского кряжа – пробы К14-014 (из Priyatkina et al., 2016)), R15-015 и R15-016 (наши новые неопубликованные данные) и одновозрастных им песчаников хр. Сетте-Дабан – юго-восточная складчатая периферия Сибирской платформы (из [Khudoley et al., 2015]).



Пространственные ориентировки плоскостных и линейных элементов структурных парагенезов, проявленных в позднедокембрийских комплексах по обе стороны от этой сдвиговой зоны, не имеют значимых различий. Татарская сдвиговая тектоническая зона пространственно наследует среднерифейский рифтогенный Рыбинско-Панимбинский вулканический пояс (рис. 4.2.10.). Начало сдвиговых перемещений по Татарской зоне обусловило формирование дуплексов растяжения (сходных по кинематике со структурами типа «pull-apart»). В образовавшиеся дуплексы растяжения внедрились тела гранитов (Чиримбинский, Тейский, Глушихинский и др. массивы) с возрастом ~880 млн лет и одновозрастных им габброидов. В дальнейшем сдвиговые дислокации обусловили формирование гнейсов, амфиболитов и кристаллических сланцев – бластомилонитов по выполняющим дуплексы гранитам, ассоциирующим с ними габброидам и вмещающим их стратифицированным образованиям. Некоторые исследователи интерпретируют эти останцы как интрузии позднерифейских гранитов в метаморфиты, относимые к архею и раннему протерозою, а в действительности, являющиеся бластомилонитами по этим же самым гранитам. Очевидно, что останцы вращались вокруг близвертикальной оси по часовой стрелке (на что указывают левосдвиговые кинематические индикаторы в бластомилонитах). Это ставит под сомнение результаты палеомагнитного изучения гранитов, слагающих эти останцы и в частности Ерудинского массива, приведенные в работе [Верниковский и др., 2016 и др.], а также – основанные на этих результатах геодинамические и плитотектонические построения.

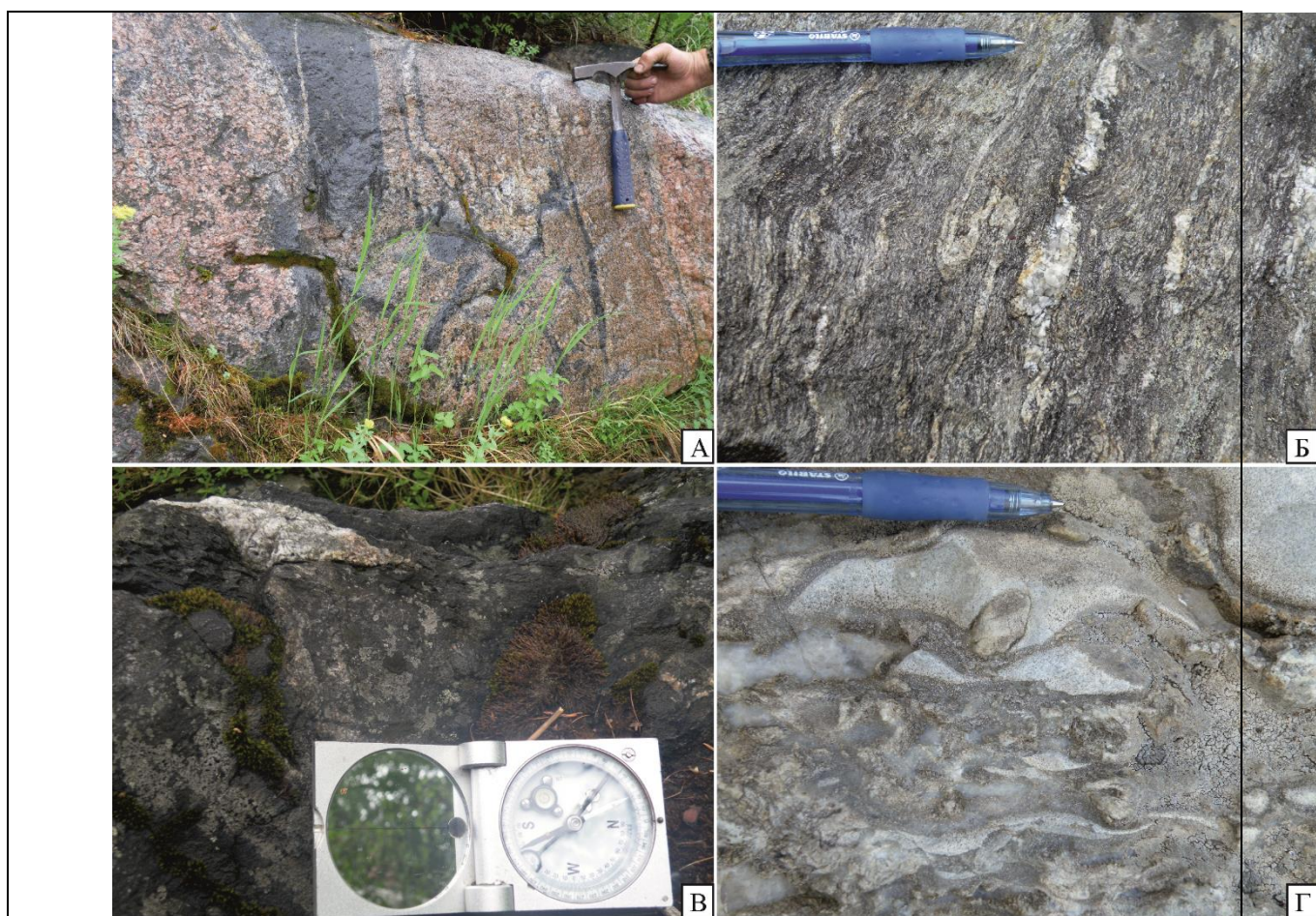


Рисунок 4.2.9. Признаки левосдвиговых смещений в Татарско-Ишимбинской подвижной зоне, маркирующей границу между Центральным-Ангарским и Восточно-Ангарским блоками Заангарской части Енисейского кряжа. А и Б – в разной степени бластомилонитизированные граниты Ерудинского массива, дислоцированные в асимметричные левосдвиговые складки с крутыми шарнирами; В и Г – асимметричные будины (показатель левосдвигового смещения) пегматоидного гранита в эпигранитных бластомилонитах Ерудинского массива (В) и мраморизованных карбонатов в калькмилонитах (Г).

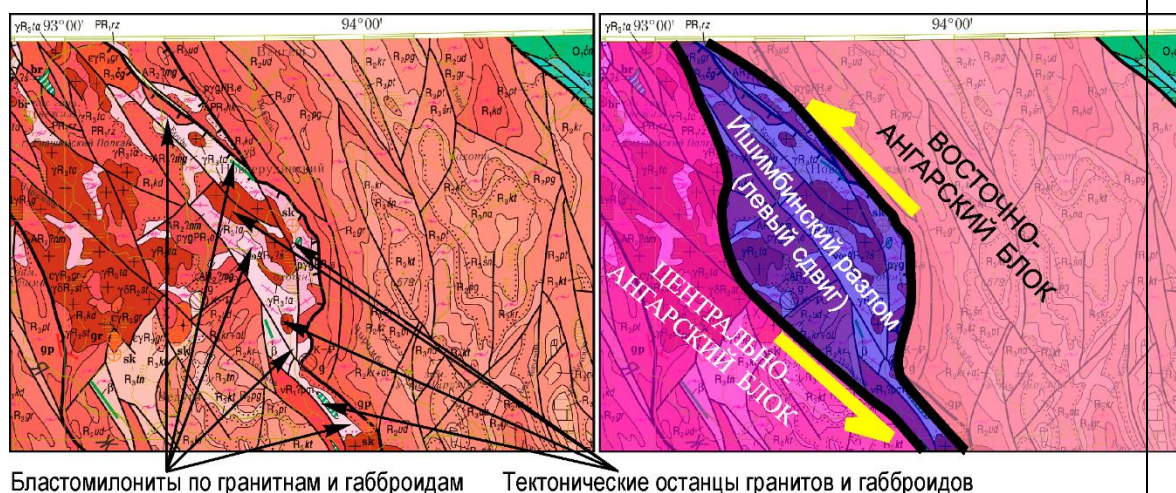


Рисунок 4.2.10. Фрагмент мелкомасштабной Государственной геологической карты третьего поколения, лист О-44 (1:1 000 000), составленной Л.К.Качевским, В.К.Зуевым и др. в 2005 г. (слева) и составленная на ее основе тектоническая схема Чиримбинско-Ерудинского участка Ишимбинской (Татарско-Ишимбинской) сдвиговой зоны, маркирующей границу между Центрально-Ангарским и Восточно-Ангарским блоками (справа).

Разработка модели тектонического развития региона

Результаты проведенных исследований накладывают серьезное ограничение на существующие представления об эволюции западного края Сибирского кратона. Более того, учет некоторых других независимых данных ставит под сомнение и само положение западной границы Сибирской платформы. И действительно, в связи с доминирующими представлениями вдоль западного ограничения Сибирского кратона в мезо- и неопротерозое развивались пассивные континентальные окраины. В позднем неопротерозое вдоль западного ограничения Сибири от Таймыра до Восточного Саяна формировались островодужные и офиолитовые ассоциации, возраст которых доказан многочисленными прецизионными данными, полученными в разных российских и зарубежных лабораториях. В связи с этим, граница Сибирского палеоконтинента проводится вблизи полей развития этих обдуцированных на Сибирский кратон комплексов, т.е. вдоль нынешнего положения р. Енисей.

При этом к западу от структур, сложенных неопротерозойскими островодужными комплексами и офиолитами (т.е. к западу от р. Енисей), сейсмическими работами и бурением показано распространение докембрийских образований [Гражданкин и др., 2015,

Конторович и др., 2012; Хераскова и др., 2009 и др.]. Большинство исследователей полагает, что это докембрийские террейны и(или) микроконтиненты, которые аккретировали с запада к Сибирскому кратону. Однако на сейсмо-геологических разрезах хорошо видно, что под вскрытыми скважиной Восток-3 палеонтологически охарактеризованными [Гражданкин и др., 2015] вендскими отложениями залегает слоистый разрез мощностью 5-7 км. Ниже залегают образования, которые, по ряду признаков, могут быть охарактеризованы как архейско-раннепротерозойский кристаллический фундамент. Нам представляется, что мощная слоистая толща, залегающая на архейско-раннепротерозойском кристаллическом фундаменте и перекрытая палеонтологически охарактеризованным вендом, представляет собой вещественный и стратиграфический эквивалент рифейских комплексов, распространенных на западе Сибирской платформы – в Байкитской антеклизе и в структурах ее обрамления. Все это заставляет нас признать, что западную границу Сибирской платформы следует проводить не вдоль нынешнего положения р. Енисей, а существенно (на 300-400 км) западнее – под мезозойско-кайнозойскими комплексами чехла Западной Сибири.

Таким образом, фиксируется парадоксальная ситуация. С одной стороны, западную границу Сибирской платформы на широте Заангарской части Енисейского кряжа следует проводить под мезозойско-кайнозойскими комплексами чехла Западной Сибири. С другой стороны, на правом берегу р. Енисей расположен Енисейский кряж, в пределах которого на современном эрозионном срезе экспонируются, в числе прочего, кристаллические комплексы неопротерозойского (позднерифейского и ранневендского) возраста, интерпретируемые в рамках модели [Верниковский др., 2016 и др.] как результат аккреционно-коллизийной тектоники на окраине Сибирского кратона. Однако некоторые важные факты не позволяют признать существование неопротерозойского аккреционно-коллизийного орогена Енисейского кряжа в его современном структурном положении. Это, в частности, отсутствие на Енисейском кряже и в сопредельных частях Сибирской платформы синорогенных обломочных формаций этого орогена и отмеченное наличие комплексов фундамента и нижних уровней чехла Сибирской платформы, прослеживающихся к западу от р. Енисей, что не позволяет признать окраинно-континентальное положение (положение на окраине Сибирского континента) аккреционно-коллизийного неопротерозойского орогена Енисейского кряжа.

Возможно, что неопротерозойские кристаллические комплексы (гранитометаморфические образования), распространенные сейчас на Енисейском кряже представляют собой не аккреционно-коллизийные образования. Возможно, что они возникли в деструктивной геотектонической обстановке – в связи с обусловленным

поднятием мантийного плюма увеличением теплового потока, связанным с этим метаморфизмом и выплавлением анарогенных магм и становлением массивов гранитов А-типа, к которым относится большинство изученных гранитов Заангарья [Верниковская и др., 2002, 2005, 2007, 2009; Романова и др., 2012]. Проявившиеся здесь крупно-амплитудные сдвиги также обусловили метафорические преобразования пород – развитие бластомилонитов по гранитам и вмещающим их породам. Такой способ формирования неопротерозойских гранитометаморфических комплексов Заангарской части Енисейского кряжа согласуется с их внутриплатформенным положением. Однако отсутствие продуктов эрозии этих гранитометаморфических образований в вендских толщах, налегающих на структуры Енисейского кряжа и обрамляющих из структур, накладывает существенные ограничения и на эти представления.

Наши новые данные о толщах, выполняющих Чапско-Тейский прогиб, свидетельствуют о том, что формирование покровно-складчатого строения Енисейского кряжа и вовлечение в эту структуру неопротерозойских кристаллических комплексов, сформированных в обстановках активных континентальных окраин и эпизодов аккреционного наращивания этими комплексами периферических зон континента, не связано напрямую с неопротерозойскими аккреционными процессами, протекавшими возле того места, где эти комплексы и структуры находятся в настоящее время (то есть там, где сейчас расположен собственно Енисейский кряж). Более вероятно, что комплексы и структуры, составляющие современный Енисейский Кряж, сформировались либо у другой окраины Сибирского кратона, либо у окраины другого кратона. Позднее они были смещены по системе сдвигов и «вдвинуты» в пределы западной части Сибирской платформы и оказались в своем современном структурном положении между временем накопления толщ, выполняющих Чапско-Тейский прогиб, в которых нет продуктов эрозии неопротерозойских комплексов, и временем накопления эвенкийской свиты, в которой продукты эрозии неопротерозойских комплексов есть.

Исследования 2017 года будут направлены на тестирование описанных выше тектонических моделей и детализацию геодинамической эволюции региона Енисейского Кряжа на основе дальнейшего изучения и интерпретации особенностей строения, характера взаимоотношений и пространственного распространения позднекембрийских и кембрийских комплексов Заангарской части Енисейского кряжа, а также пространственно сопряженных с ним структур Сибирской платформы и ЦАПСП.

4.3. Анализ данных по палеомагнетизму неопротерозоя Сибирской платформы. Разработка современной версии неопротерозойской кривой кажущейся миграции полюса для Сибирской платформы.

Палеомагнитные ограничения на конфигурацию суперконтинента Родиния.

Введение.

Несмотря на то, что история изучения палеомагнетизма верхнего рифея Сибирской платформы насчитывает уже несколько десятилетий, вопрос о положении палеомагнитных полюсов позднего докембрия остается одной из нерешенных проблем сибирской палеомагнитологии. Отчасти, причиной этому является то, что современные требования к палеомагнитному результату относительно недавно вошли в практику отечественных исследований. С другой стороны, понятно, что продолжительность позднего рифея (около 400 млн. лет) просто несопоставима с объемом проведенных исследований и требуются значительные усилия для того, чтобы получить такое количество палеомагнитных определений, которое было бы достаточно для сколько-нибудь точного представления о характере миграции палеомагнитного полюса Сибирской платформы в позднем рифее (неопротерозое). Работа, отчет по которой представлен в настоящем разделе, является попыткой в какой-то степени заполнить зияющие пустоты в сибирской позднерифейской палеомагнитной записи и на основе результатов, полученных нами и нашими коллегами, предложить предварительную модель соответствующего сегмента кривой кажущейся миграции полюса, которая отражала бы современное состояние знаний по этой проблеме.

Объекты исследований.

В ходе настоящей работы был изучен ряд опорных разрезов верхнего рифея в различных регионах Сибирской платформы (рис. 4.3.1.). В пределах Туруханского поднятия нами изучены терригенные и карбонатные отложения деревнинской и мироедихинской свит, опробованные в серии обнажений, расположенных в долинах рек Н.Тунгуска, Сухая Тунгуска, Каменная, Мироедиха и др. На территории Оленекского поднятия в долине среднего течения р. Хорбусуонка изучены песчаники, алевролиты и строматолитовые доломиты верхнехайпахской подсвиты. В Удинском Присянье в береговых обнажениях р. Уда изучены красноцветные разности терригенной карагасской серии (преимущественно, тагульская свита). Кроме того, в ряде обнажений, расположенных по обоим берегам р.

Уды между устьями Сухой Речки и р. Ярмы, опробован шток базитов нерсинского комплекса.

Палеомагнитный анализ.

Ниже представлены краткие результаты палеомагнитного анализа изученных объектов (см. рис. 4.3.2.):

Туруханское поднятие. Стабильная древняя компонента намагниченности уверенно выделяется в породах деревнинской свиты. Направления этой компоненты согласуются между удаленными обнажениями, тест складки дает положительный результат. После поправки за открытие Вилюйской рифтовой системы рассчитанный палеомагнитный полюс ложится в непосредственной близости от палеомагнитного полюса близкой по возрасту лахандинской серии Учуро-Майского района. Все это указывает на то, что выделенная компонента сформировалась во время или вскоре после формирования деревнинской свиты. Биполярная стабильная компонента намагниченности выделена в двух обнажениях мироедихинской свиты – в долине р. Мироедиха и на правом берегу Енисея, ниже устья последней. Положительные результаты тестов складок и обращения, а также отличие соответствующего палеомагнитного полюса от известных более молодых полюсов Сибирской платформы указывают на то, что возраст выделенной компоненты близок к возрасту мироедихинской свиты.

Оленекское поднятие. Наличие направлений прямой и обратной полярности, при положительном результате теста обращения, выдержанность направлений на изученной территории, их независимость от магнитной минералогии и отличие рассчитанного полюса от более молодых полюсов Сибирской платформы – все это дает основания полагать, что характеристическая намагниченность, выделенная нами в породах верхнехайпахской подсвиты, сформировалась во время или вскоре после формирования этих пород.

Удинское Присяянье. В изученных породах карагасской серии выделены две стабильные компоненты намагниченности – среднетемпературная и высокотемпературная. Привлекая данные, полученные ранее Д.В. Метелкиным (2005) [Метелкин и др., 2005] по р. Бирюса, мы показываем, что первая из этих компонент является синскладчатой и имеет кембрийский возраст; вторая компонента – доскладчатая и возникла во время формирования пород. Направления характеристической намагниченности, выделенные нами в нерсинской интрузии, близки к таковым, полученным Д.В. Метелкиным по нерсинским силам р. Бирюса (2005). Это дает нам основание использовать положительный результат теста контактов, выполненного Д.В. Метелкиным (2005) для обоснования первичности намагниченности изученного нами магматического тела.

Тренд палеомагнитных полюсов и дрейф Сибирской платформы в неопротерозое

Выполнен критический разбор модели Д.В. Метелкина с соавторами [Метелкин и др., 2005, 2007], описывающей неопротерозойскую ТКМП для Сибирской платформы. Детальный анализ показывает, что эта модель опирается в ряде случаев на довольно спорные палеомагнитные полюсы и требует существенной переработки и развития.

С использованием палеомагнитных данных, полученных нами по Туруханскому и Оленекскому поднятиям и по Удинскому Присянью, предлагается новая модель, включающая в себя 2 варианта (рис. 4.3.3.). Существование этих вариантов определяется наличием альтернативных полюсов для времени $\sim 760\text{--}740$ млн лет – удинско-бирюсинских [Метелкин и др., 2005, 2010] и шарыжалгайских [Pisarevsky et al., 2013]. Согласно предлагаемой модели в конце мезопротерозоя – самом начале неопротерозоя Сибирская платформа переместилась из субтропического пояса северного полушария в тропические широты южного, после чего произошло изменение направления широтного дрейфа и к верхнехайпахскому времени Сибирь почти полностью оказалась в приэкваториальных широтах северного полушария. Далее, ко времени $\sim 760\text{--}750$ млн лет, Сибирь либо продолжает перемещаться к северу до тропических широт северного полушария с вращением против часовой стрелки (*вариант 1*), либо остается в приэкваториальной области, испытывая небольшие смещения к югу без заметных вращений (*вариант 2*). Затем движение Сибирского кратона приобретает устойчивое южное направление, которое выдерживается вплоть до конца эдиакарского времени.

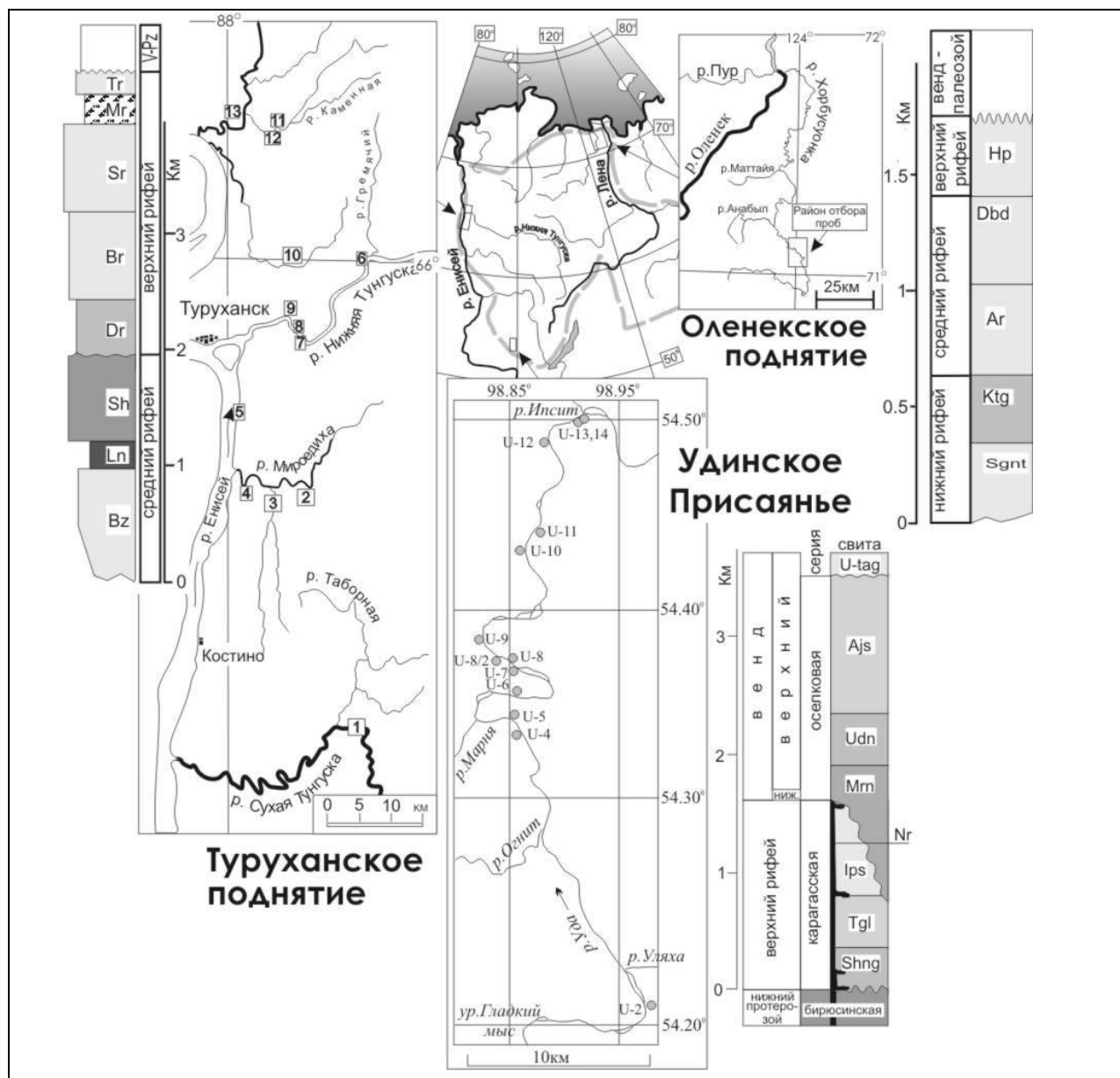


Рисунок 4.3.1. Стратиграфические схемы и местоположения изученных объектов. Туруханское поднятие. Свиты: Bz- безыменная, Ln- линок, Sh- сухотунгусинская, Dr- древнинская, Br- буровой, Sr- шорихинская, Mr- мироедихинская, Tr- туруханская. V-Pz- венд-фанерозойские отложения. Оленекское поднятие. Свиты: Kph - хайпахская; Dbd - дебелгдинская; Ar - арымасская; Ktg - кетюнгдинская; Sgnt - сагынахтахская. Удинское Присянье. Свиты: Shng - шангулежская, Tgl - тагульская, Ips - ипситская, Mrn - марнинская, Udn - удинская, Ajs - айсинская, U-tag - усть-тагульская; Nr - нерсинский комплекс (силлы и дайки). Цифры на схеме внутри квадратов и с индексом “U” – положение изученных обнажений.

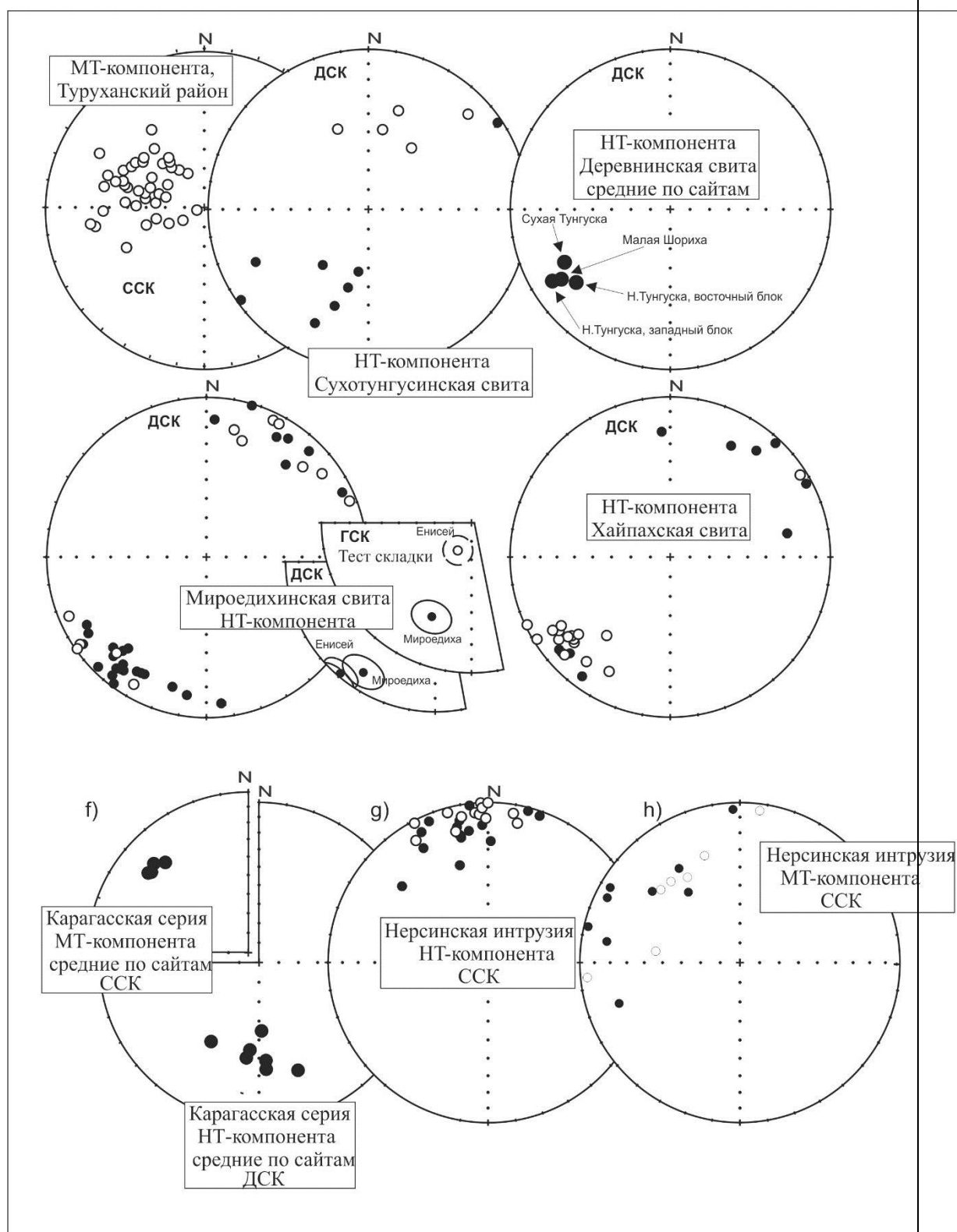
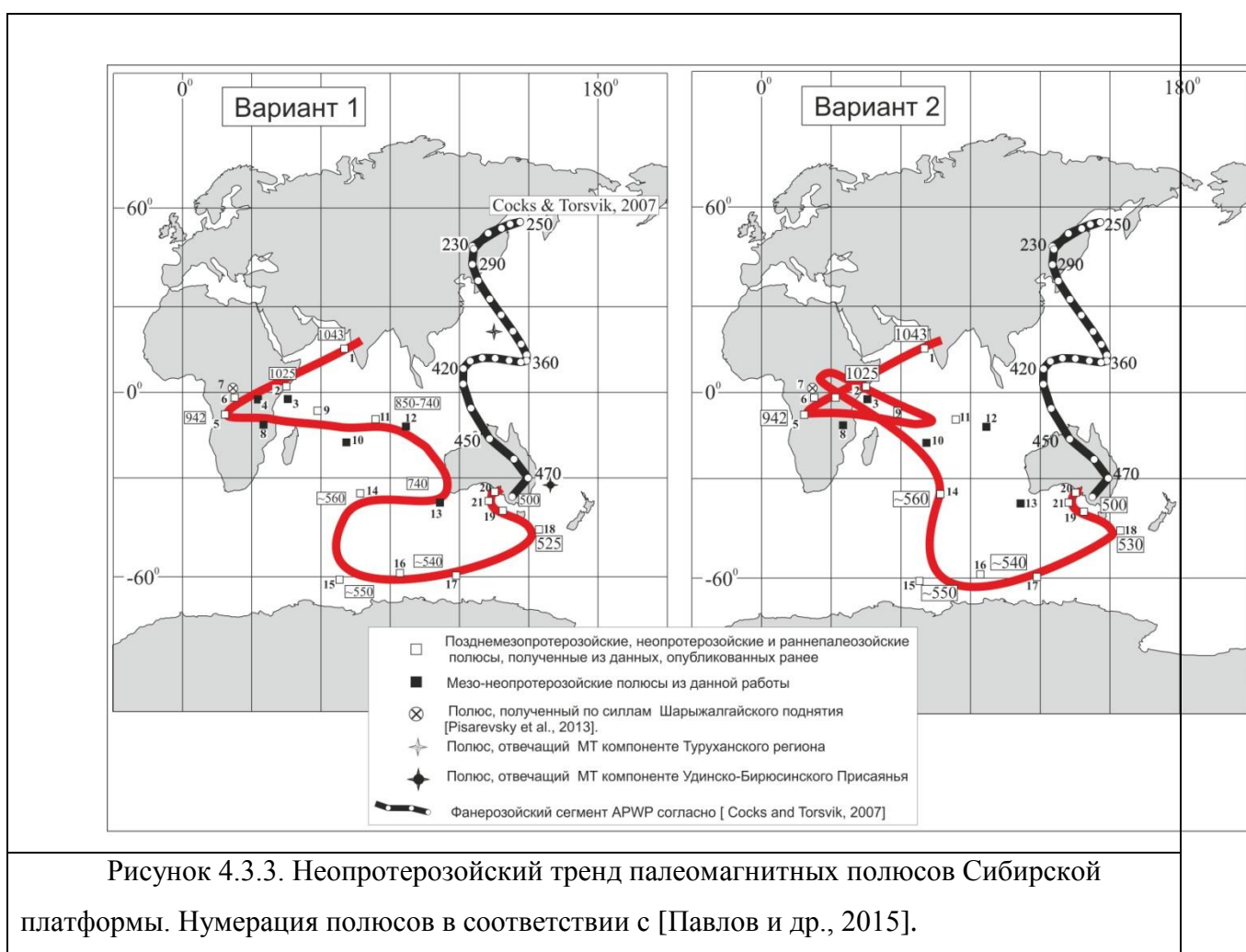


Рисунок 4.3.2. Распределение векторов компонент намагниченности в изученных объектах Туруханского и Оленекского поднятий и Удинского Присяянья.

Анализ кривой кажущейся миграции полюса и дрейф Северо-Американской платформы в конце мезопротерозоя и в неопротерозое.

Выполнен анализ кривой кажущейся миграции полюса и дрейф Северо-Американской платформы (Лаврентии) в интервале времени 1100–720 млн лет назад. Несмотря на то, что существуют определенные различия в оценке положения начальной части лаврентийской кривой кажущейся миграции полюса для неопротерозоя, на данном этапе исследований их можно рассматривать как различия второго порядка.

Эти расхождения не меняют интерпретацию принципиально (в частности, общую оценку палеогеографического положения Лаврентии), но имеют значение для выяснения деталей тех или иных палеотектонических реконструкций. На протяжении многих лет дискутируется форма так называемой «гренвильской петли», т.е. участка лаврентийской кривой КМП, отвечающего приблизительно интервалу времени 950–750 млн лет.



Недавние палеомагнитные определения, полученные по стратиграфической последовательности слагающей среднюю и верхнюю часть супергруппы Большого Каньона [Weil et al., 2003, 2004, 2006], практически снимают эту проблему, подтверждая точку зрения, согласно которой смещение палеомагнитных полюсов в рассматриваемом временном интервале происходило против часовой стрелки. Выполненный анализ позволяет предло-

жить последовательность палеомагнитных полюсов, описывающих дрейф Лаврентии в интервале 1100–720 млн лет. Согласно этим данным, в интервале 1.1–0.95 млрд лет Лаврентия подобно Сибирской платформе перемещалась из субтропических широт северного полушария в тропические и субтропические широты южного полушария.

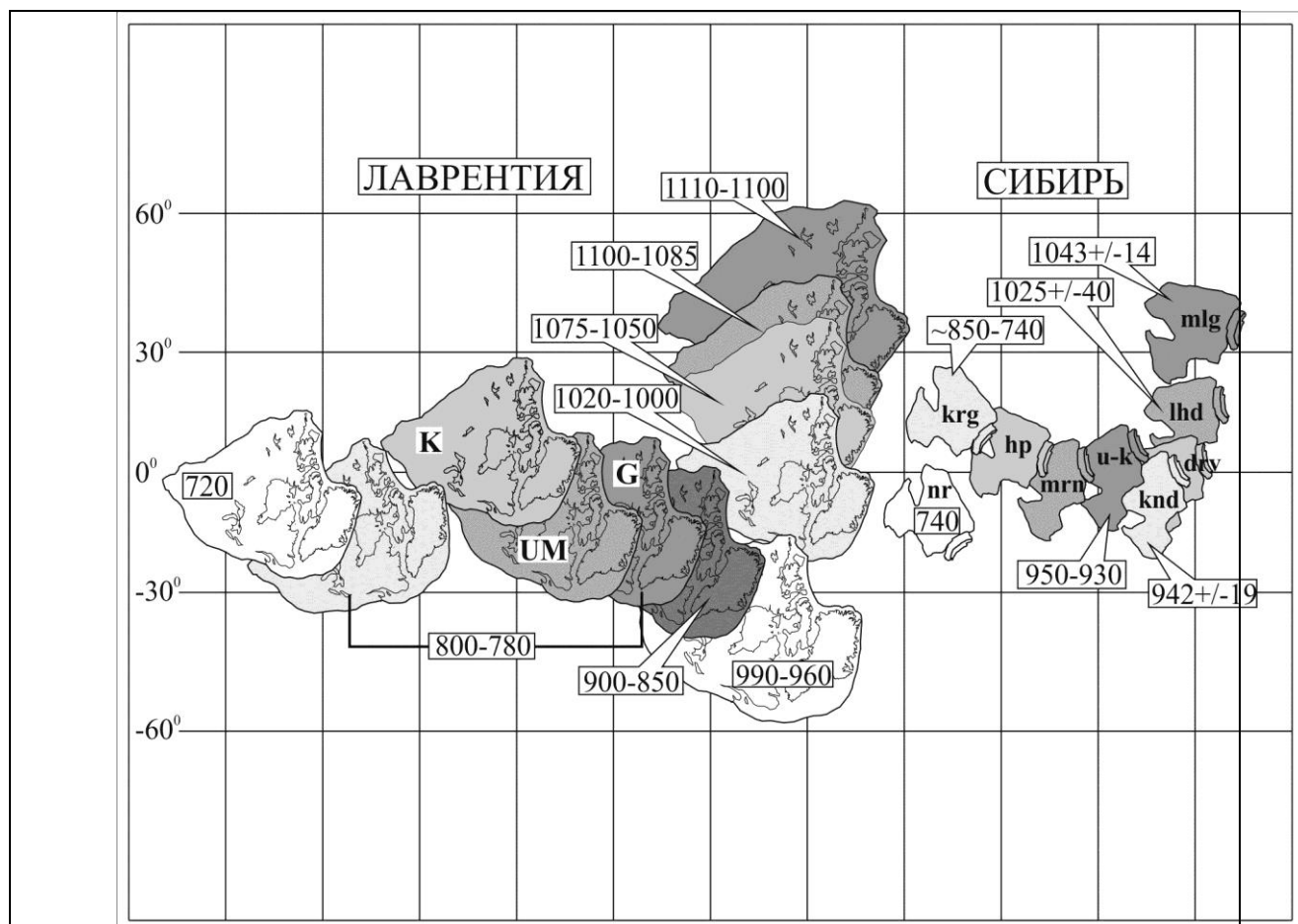


Рисунок 4.3.4. Дрейф Сибирской платформы и Лаврентии в интервале 1100-720 млн.лет согласно варианту 1 предлагаемой модели. Вариант 2 исключает положения Сибири с индексами krg и nr и включает положение Сибири ~760млн. лет назад приблизительно такое же, как показано для кандыкского (kno) времени. Индексы: K- Kwagunt formation, UM-Uinta Mountain Group, G-Galeros formation; nr- нерсинское время, krg- карагасское, hp- хайпахское, mrn- мироедихинское, u-k- усть-кирбинское, kno- кандыкское, drv- деревнинское, lhd- лахандинское, mlg- малгинское. Цифры - возраст в миллионах лет.

Вблизи временного уровня 990–960 млн лет Лаврентия подобно Сибири меняет направление своего широтного дрейфа и начинает перемещаться к северу. Ко времени накопления свиты Квагунт (~740 млн лет, супергруппа Большого Каньона), Лаврентия (ее центральные области) оказывается на экваторе, где и остается, по крайней мере, до 720 млн лет назад.

Сопоставление сибирской и лаврентийской кривых кажущейся миграции полюса.

Выполнено сравнение позднемезопротерозойских-неопротерозойских сегментов кривых КМП Сибири и Лаврентии, которое показывает, что в случае принятия *варианта 1* нашей модели совпадение сибирской и лаврентийской кривых наблюдается, в лучшем случае, лишь до мироедихинского времени (~900 млн лет), затем кривые расходятся.

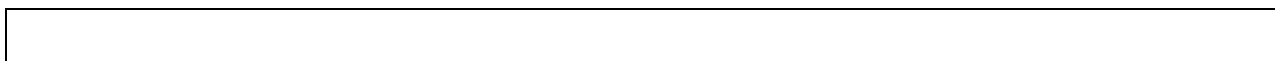
Это значит, что с этого времени Лаврентия и Сибирь не могли являться частями единой плиты. Близкий вывод следует из анализа выполненного Т.Н. Херасковой с соавторами [Хераскова и др., 2009]. Обращает на себя внимание при этом, что расхождение кривых отражает первоначально скорее наличие относительных вращений этих кратонов, а не их расхождение. Широтные же составляющие их движений остаются подобными: генеральное согласование широтных перемещений Сибири и Лаврентии (рис. 4.3.4., 4.3.5.) можно проследить вплоть до карагасского и, возможно, нерсинского времени. В этой связи, интересно отметить, что подобное соотношение Сибири и Лаврентии предполагалось авторами работы [Метелкин и др, 2007] при сравнении их модели APWP с соответствующей лаврентийской моделью. Однако, если подобно авторам работы [Метелкин и др., 2007] интерпретировать такое поведение как отражение сдвиговых смещений, то в нашем случае следует предполагать, что не право-, а левосдвиговые смещения Сибири относительно Лаврентии предшествовали полному разделению этих кратонов. *Вариант 2* интересен тем, что для сибирской Траектории кажущейся миграции полюса предполагается наличие петли, соответствующей гренвильской петле в КМП Лаврентии. Несмотря на то, что формы этих петель в деталях не совпадают, само наличие близких по возрасту петель на сибирской и лаврентийской кривых КМП можно рассматривать как сильное указание на то, что, по крайней мере, до 760 млн лет назад данные кратоны являлись частями единого суперконтинента. Различия же в форме петель может объясняться либо недостаточностью имеющегося палеомагнитного материала, либо сравнительно небольшими относительными смещениями Сибири и Лаврентии внутри суперконтинента.

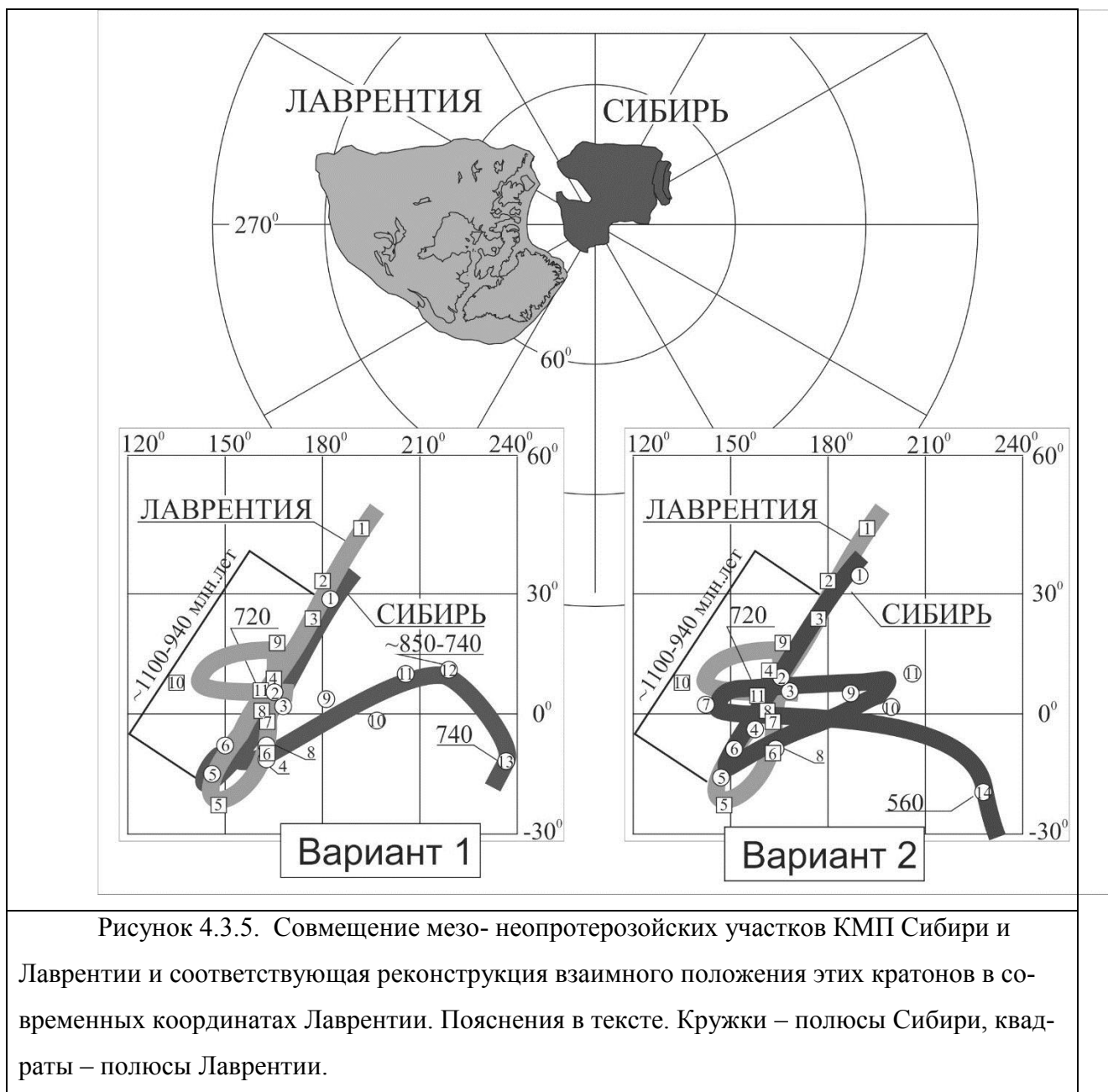
Выводы:

- 1) Получены новые палеомагнитные определения для позднерифейских образований Туруханского и Оленекского поднятий и Удинского Присяянья, которые в сочетании с ранее опубликованными данными позволяют предложить для Сибирской платформы предварительную модель неопротерозойской кривой кажущейся миграции полюса;
- 2) Предлагаемая модель содержит 2 варианта, существование которых определяется наличием альтернативных полюсов для времени ~760-740 млн. лет – удинско-бирюсинских [Метелкин и др., 2005, 2010, настоящая работа] и шарыжалгайских [Pisarev-

sky et al., 2013]. Согласно этой модели в конце мезопротерозоя – самом начале неопротерозоя Сибирская платформа переместилась из субтропического пояса северного полушария в тропические широты южного, после чего произошло изменение направления широтного дрейфа и к хайпахскому времени Сибирь почти полностью оказалась в приэкваториальных широтах северного полушария. Далее, ко времени ~ 760-750 млн. лет, Сибирь либо продолжает перемещаться к северу до тропических широт северного полушария с вращением против часовой стрелки (вариант 1), либо остается в приэкваториальной области, испытывая небольшие смещения к югу без заметных вращений (вариант 2). Затем движение Сибирского кратона приобретает устойчивое южное направление, которое выдерживается вплоть до конца эдиакарского времени.

3) Сравнение позднемезопротерозойских-неопротерозойских сегментов кривых кажущейся миграции полюса Сибири и Лаврентии свидетельствует, в случае принятия вариант 1, в пользу того, что со времени ~900 млн. лет назад эти кратоны не могли входить в состав единой жесткой плиты, однако, по крайней мере, до 740-760 млн. лет назад могли являться составными частями единого континентального агломерата (континента) .





Вариант 2 позволяет в первом приближении согласовать сибирскую и лаврентийскую траектории кажущейся миграции полюса для интервала времени от ~ 1050-1100 до ~760 млн. лет, что может рассматриваться как сильное указание на то, что в течение этого времени Сибирь и Лаврентия входили в состав единого суперконтинента.

4.4. Палеомагнетизм верхнеэдиакарских обломочных пород Южного Урала и палеогеографическое положение Балтики в конце неопротерозоя.

Введение.

Конец протерозоя (эдиакарий) – начало фанерозоя – один из наиболее интересных интервалов в геологической истории нашей планеты. Начало эдиакария соответствует завершению эпохи великих позднепротерозойских оледенений, завершение эдиакария отмечено резким эволюционным всплеском, приведшим к наступлению фанерозойской эры. Согласно ряду исследователей это время характеризовалось очень быстрым дрейфом континентов, значительными истинными смещениями полюса, взаимодействием суперплюмов с литосферой, крайне необычным поведением геомагнитного поля и проч. Мировые палеомагнитные данные по этому периоду времени крайне противоречивы, при этом их количество относительно мало. Очевидно, что недостаток палеомагнитных данных по эдиакарию существенно ограничивает возможности построения палеореконструкций, в частности и, решения многих важных проблем наук о Земле в целом.

Число эдиакарских объектов, пригодных для постановки палеомагнитных исследований крайне ограничено. Одним из перспективных объектов для этого являются терригенные породы ашинской серии Южного Урала. В данном разделе представлены результаты палеомагнитных исследований этих пород и некоторые тектонические следствия, вытекающие из полученных результатов.

Объект исследований.

Нами было изучено 49 обнажения эдиакарской басинской свиты, слагающей нижнюю часть позднепротерозойской ашинской серии (рис. 4.4.1.). Имеющиеся данные позволяют ограничить возраст басинской свиты интервалом 560-575 млн. лет.

Изученные обнажения распределены на расстоянии более 100 км и сложены, главным образом красноцветными и зеленоцветными алевролитами и мелкозернистыми песчаниками. Всего было отобрано и изучено более 500 ориентированных образцов.

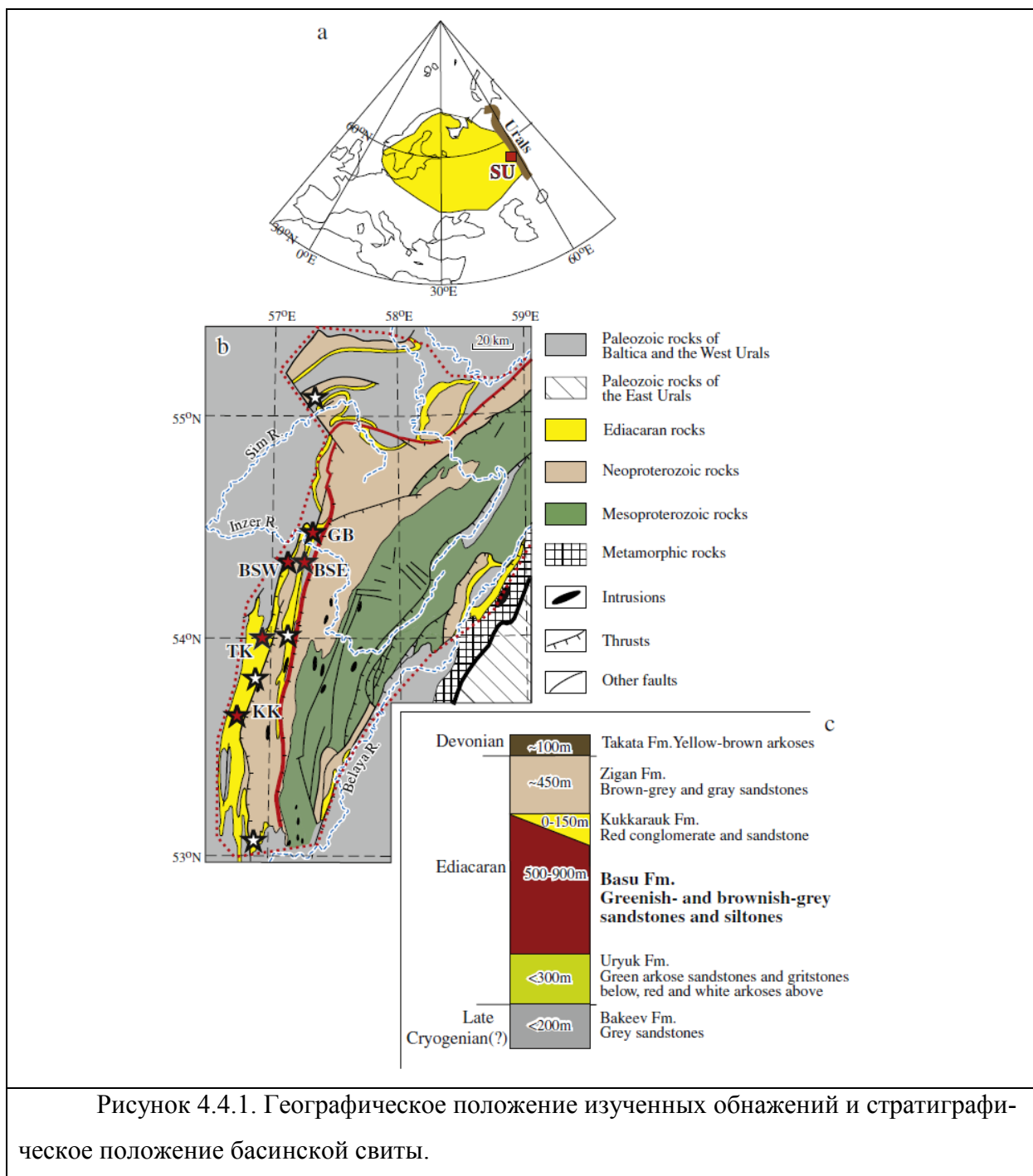


Рисунок 4.4.1. Географическое положение изученных обнажений и стратиграфическое положение басинской свиты.

Результаты палеомагнитных исследований.

С помощью детальной температурной чистки в изученных породах была выделена биполярная характеристическая высокотемпературная компонента намагниченности, носителем которой является, как правило, гематит (рис. 4.4.2., 4.4.3.).

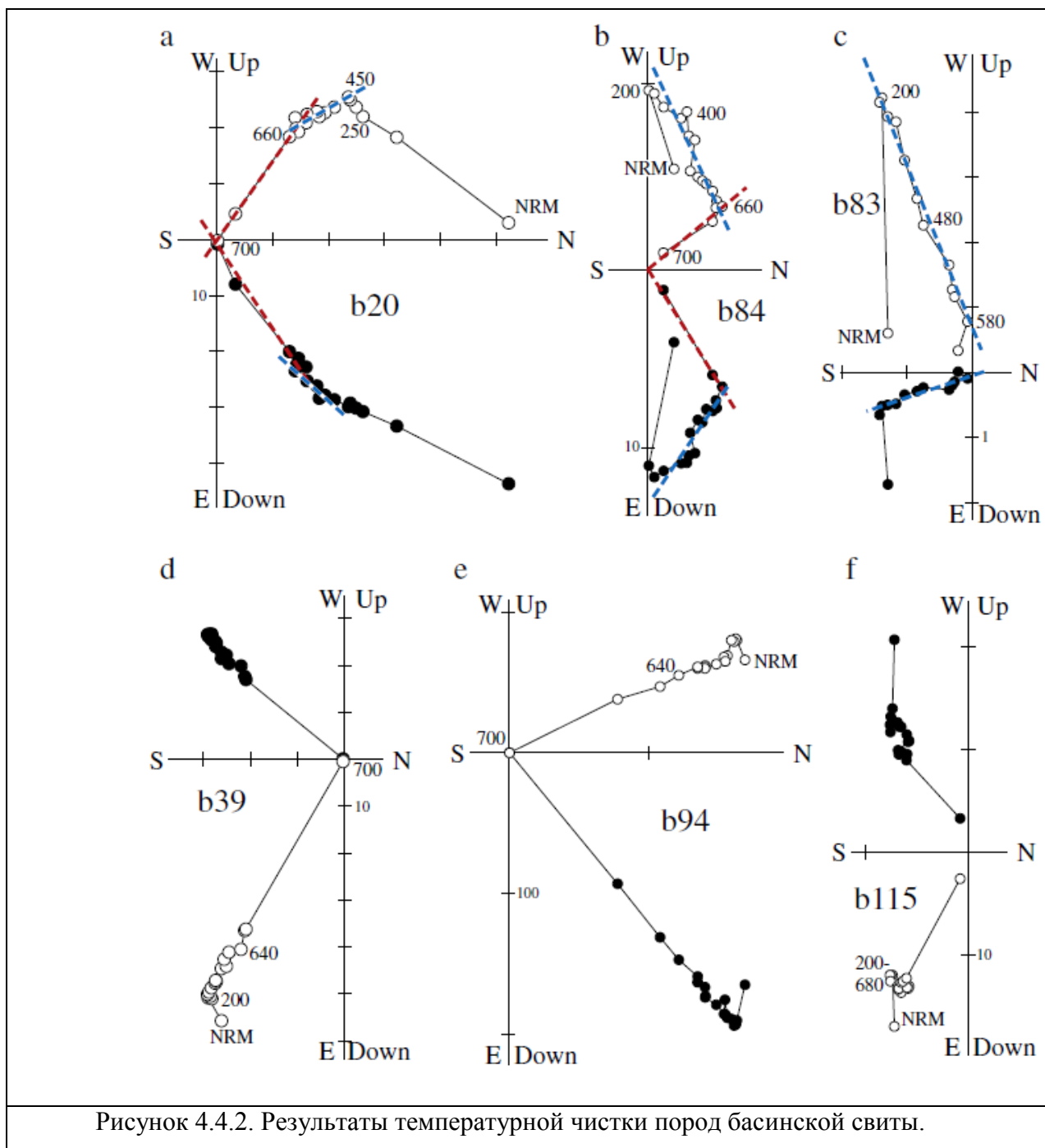
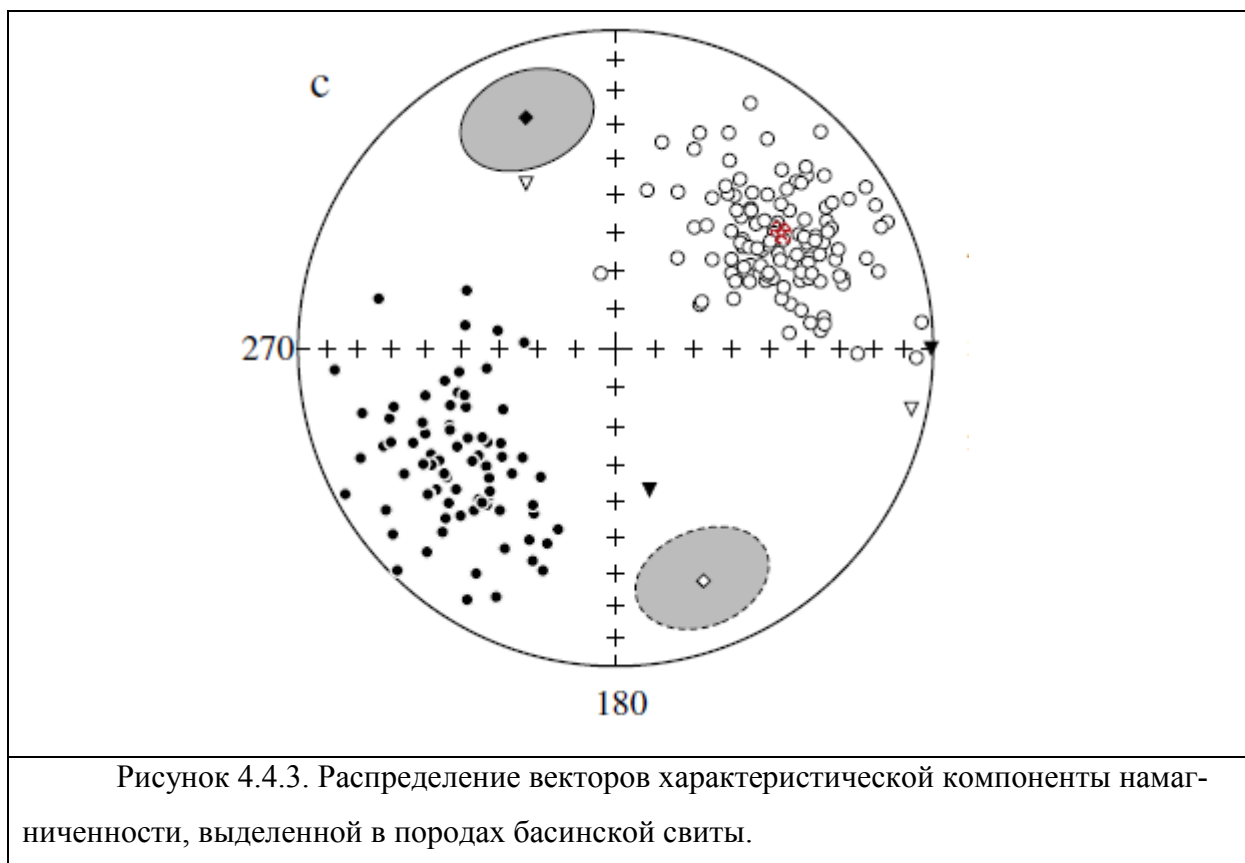


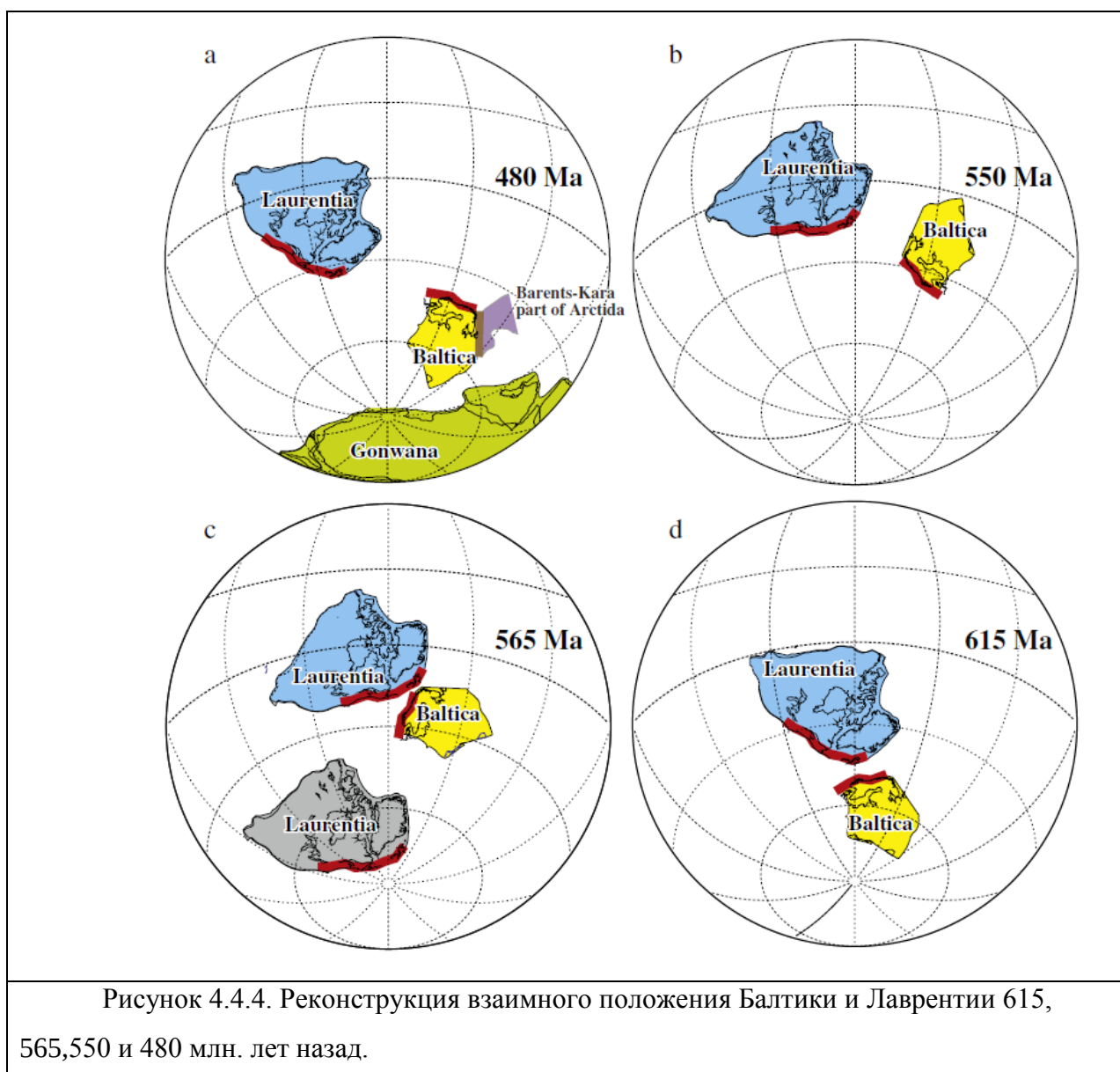
Рисунок 4.4.2. Результаты температурной чистки пород басинской свиты.

Эта характеристическая компонента была выделена в 34 сайтах. Выполненные полевые тесты уверенно указывают на доскладчатый возраст намагниченности. Более того, результаты исследования крыльев обнаруженной в одном из обнажений складки оползания, позволяют уверенно говорить о том, что выделенная характеристическая компонента сформировалась во время либо вскоре после формирования пород басинской свиты.



Изучен вопрос о возможном влиянии занижения наклона на полученное среднее палеомагнитное направление. Показано, что такое влияние не могло быть значительным, следовательно, не могло существенно исказить координаты расчетного палеомагнитного полюса.

Таким образом, полученные данные позволяют рассчитать палеогеографическое положение Балтики между 560 и 575 млн. лет назад (рис. 4.4.4.).



Обсуждение и выводы.

Данные, полученные в настоящей работе, будучи рассмотрены совместно с ранее опубликованными палеомагнитными данными по позднему протерозою – раннему палеозою Балтики позволяют сделать следующие заключения о палеогеографическом положении Балтики в это время и о кинематике ее дрейфа:

- 1) В интервале времени 616–565 миллионов лет назад Балтика перемещалась из относительно высоких широт в субтропические и тропические. Скорость ее широтного смещения составляет примерно $0.9^\circ/\text{млн.лет}$ (9 см/год), при этом она поворачивается на угол около 30° против часовой стрелки;
- 2) В интервале 565–550 млн. лет Балтика продолжает смещаться к экватору, скорость дрейфа составляет $\sim 0.8^\circ/\text{млн. лет}$ (8 см/год). Ее вращение (относительно мериди-

ана) против часовой стрелки ускоряется, а суммарный поворот в течение рассматриваемого временного интервала составляет около 100° ;

3) С позднего эдиакария по начало ордовика Балтика меняет направление своего дрейфа и перемещается в направлении к полюсу со скоростью $\sim 0.7^\circ/\text{млн. лет}$ (7 см/год). Направление вращения кратона также меняется. В течение этого временного интервала Балтика разворачивается на угол около 100° по часовой стрелке относительно меридиана.

Рассчитанные нами скорости дрейфа довольно большие, но не аномальные. Подобные скорости известны для фанерозойской истории кратонов.

4.5. Разработка модели тектонической эволюции Байкало-Патомской складчатой области в позднем докембрии – палеозое.

Актуальность

Реконструкция взаимодействия древних кратонов с прилегающими орогенными поясами, а также определение взаимного положения кратонов в геологическом прошлом относятся к важнейшим фундаментальным задачам наук о Земле. Одним из наиболее эффективных подходов для решения данной задачи является комплексное палеомагнитное и геохронологическое исследование древних осадочных и магматических толщ древних кратонов и их складчатого обрамления. Изотопное датирование обломочных цирконов из отложений древних приплатформенных бассейнов и из потенциальных источников сноса (террейнов, других кратонов) является важной составной частью геохронологических исследований и, среди прочего, позволяет: тестировать различные палеотектонические и палеогеографические гипотезы, построенные, в частности, на палеомагнитной основе; получать временные ограничения на возраст осадочных толщ и геологических объектов другого генезиса; ограничивать возраст начала аккреции террейнов к кратону;

Цели исследования

1. Тестирование существующих палеомагнитных реконструкций взаимного положения Сибири и Лаврентии в составе суперконтинента Родиния;
2. Реконструкция эволюции Байкало-Патомской окраины Сибирской платформы от позднего докембрия до позднего палеозоя.

Задачи исследования

1. Получить палеомагнитные ограничения на эволюцию Байкало-Патомской окраины Сибирской платформы.
2. Выполнить изотопное датирование обломочных цирконов из пород южного обрамления Сибирского кратона и, в частности, из Байкало-Патомского разреза;
3. Выполнить датирование обломочных цирконов из палеозойских свит: эмяк-синской (р.Виллой), точерской (Байкало-Муйский пояс - ЦАСП);
4. Произвести синтез и оценку вероятных источников сноса цирконов, как на территории Сибирского кратона, так и в пределах ЦАСП.
5. Выполнить геологическую интерпретацию полученных данных; разработать модель эволюции Байкало-Патомской складчатой области в позднем протерозое - палеозое.

Объекты исследования

Основные работы проводились на территории Байкало-Патомского и Байкало-Муйского складчатых поясов (рис. 4.5.1.). Байкало-Патомский пояс развит на территории бывшего окраинного бассейна Сибирского кратона, тогда как более южная Байкало-Муйская область лежит в пределах ЦАСП (рис. 4.5.1.).

Дополнительные работы проводились в центре Сибирской платформы (среднее течение р. Виллюй) и в её юго-западной присаянской части.

Байкало-Патомский пояс

Изученный разрез включает в себя пять серий: тепторгинская (в её составе выделяют - вверх по разрезу - пурпольскую и медвежевскую свиты), баллаганнахская (хорлухтахская, хайвергинская, бугарихтинская и мариинская свиты), дальнетайгинская (джемкуканская, баракунская и валюхтинская свиты), жуинская (никольская и ченчинская свиты) и бодайбинская (жербинская и тинновская свиты) (рис. 4.5.2.). Основание разреза залегает непосредственно на фундаменте Сибирского кратона, а верх разреза перекрывается кембрийскими отложениями нохтуйской свиты. Разрез опробовался посвитно, цирконы удалось выделить из пурпольской (2 обр.), хорлухтахской, хайвергинской, бугарихтинской, мариинской, джемкуканской (3 обр.), баракунской, валюхтинской, жербинской (2 обр.) свит.

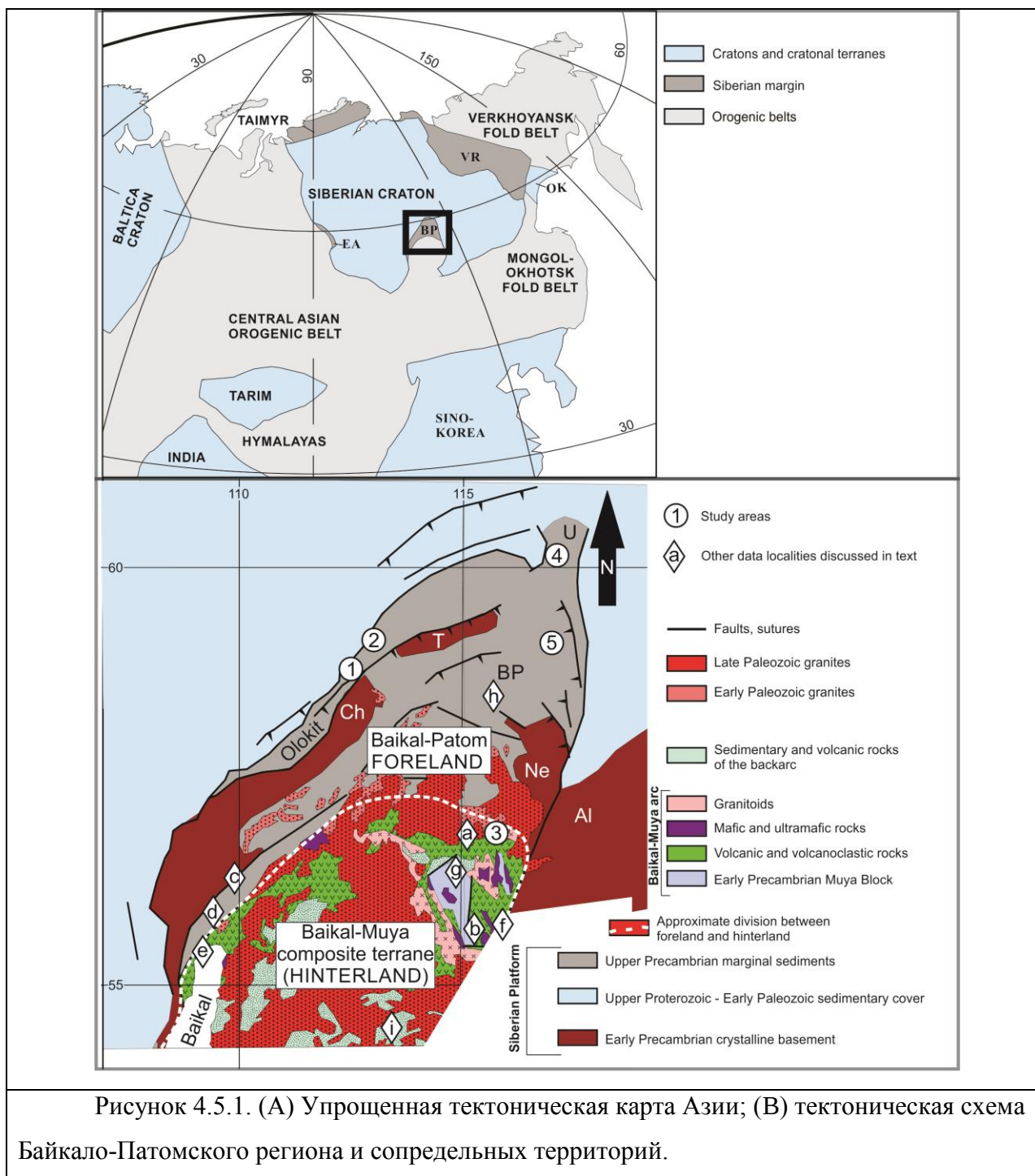


Рисунок 4.5.1. (А) Упрощенная тектоническая карта Азии; (В) тектоническая схема Байкало-Патомского региона и сопредельных территорий.

Байкало-Муйский пояс

На территории Байкало-Муйского пояса (БМП) нами была опробована позднедокембрийская падринская серия, представленная вулканогенно-осадочными породами: порфирами, туфолатами, лавобрекчиями, туфами, туфопесчаниками и туфоконгломератами. Рыцком с соавторами [Рыцк и др., 2004]

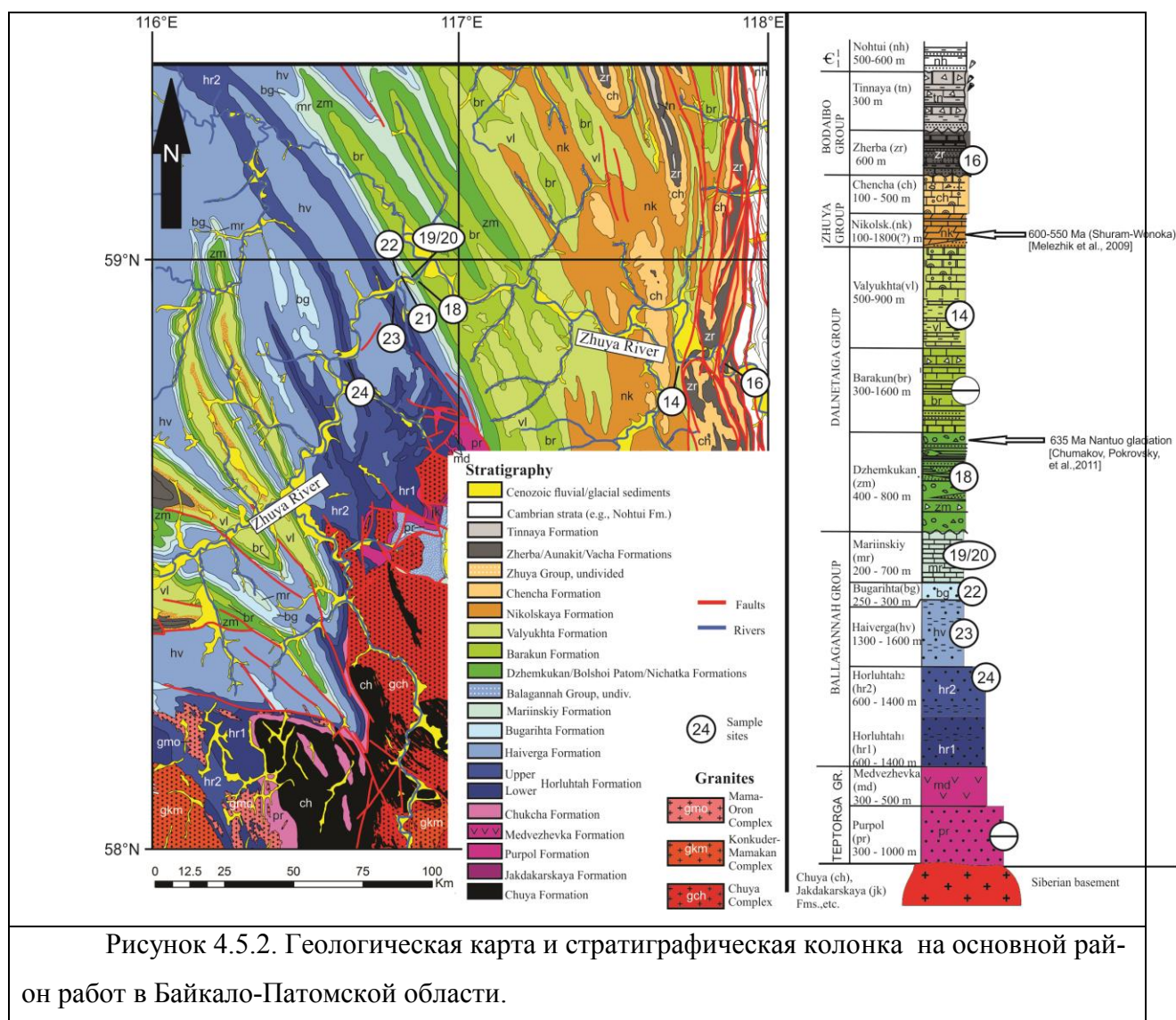


Рисунок 4.5.2. Геологическая карта и стратиграфическая колонка на основной район работ в Байкало-Патомской области.

по магматическим цирконам из брекчированных риолитов падринской серии была получена изотопная датировка (590 ± 5 млн. лет). Нами из песчаников падринской серии были выделены и датированы обломочные цирконы.

Также на территории БМП нами была опробована точерская свита (поздний девон – ранний карбон), представленная песчаниками и конгломератами.

Центральная часть Сибирской платформы

Для тестирования предположения о топографическом поднятии в районе БМП в палеозойское время были отобраны аркозовые пески раннекарбоновой эмьяксинской свиты (р. Виллой).

Объекты палеомагнитных исследований

Нами была отобрана и исследована представительная палеомагнитная коллекция образцов позднего докембрия - раннего кембрия из удаленных разрезов Байкало-Патомского региона и Уринского антиклинория (кумах-улахская, никольская, ченчинская,

торгинская, нохтуйская свиты, по рекам М.Тора, Сень, Мокрый Кумах-Улах, Ченча, Жуя, Лена и Ура).

Полученные результаты

Палеомагнитные результаты

Интерпретируемый результат был получен по неопротерозойской части изученных объектов Байкало-Патомской области и Уринского антиклинория. Полученные предварительные данные в целом указывают на низкоширотное (приэкваториальное) положение Сибирской платформы в позднем неопротерозе, с другой стороны новые данные говорят о высокой вариабельности геомагнитного поля в это время. В частности, такие данные получены при детальном (послойном) изучении постледниковых отложений (венчающих карбонатов) кумах-улахской свиты из разреза р.Сень. Характер изменения направления вектора намагниченности по разрезу в этом объекте указывает на его систематический (от слоя к слою) и при этом «произвольный» (в масштабе изученного фрагмента разреза) дрейф по склонению и наклонению с отклонением более 50 градусов от общего среднего направления. По нашему мнению этот факт может указывать на очень нестабильное состояние магнитного поля, соответствующего времени накопления пород и, в конечном счете, ставит вопрос о степени соответствия магнитного поля этого времени полю Центрального Осевого Диполя. Эти предварительные данные нуждаются в дополнительном фактическом обосновании с отбором нескольких сплошных палеомагнитных профилей и их сопоставления. В этой связи мы пока с осторожностью относимся к тектонической интерпретации полученных палеомагнитных данных по изученным объектам региона.

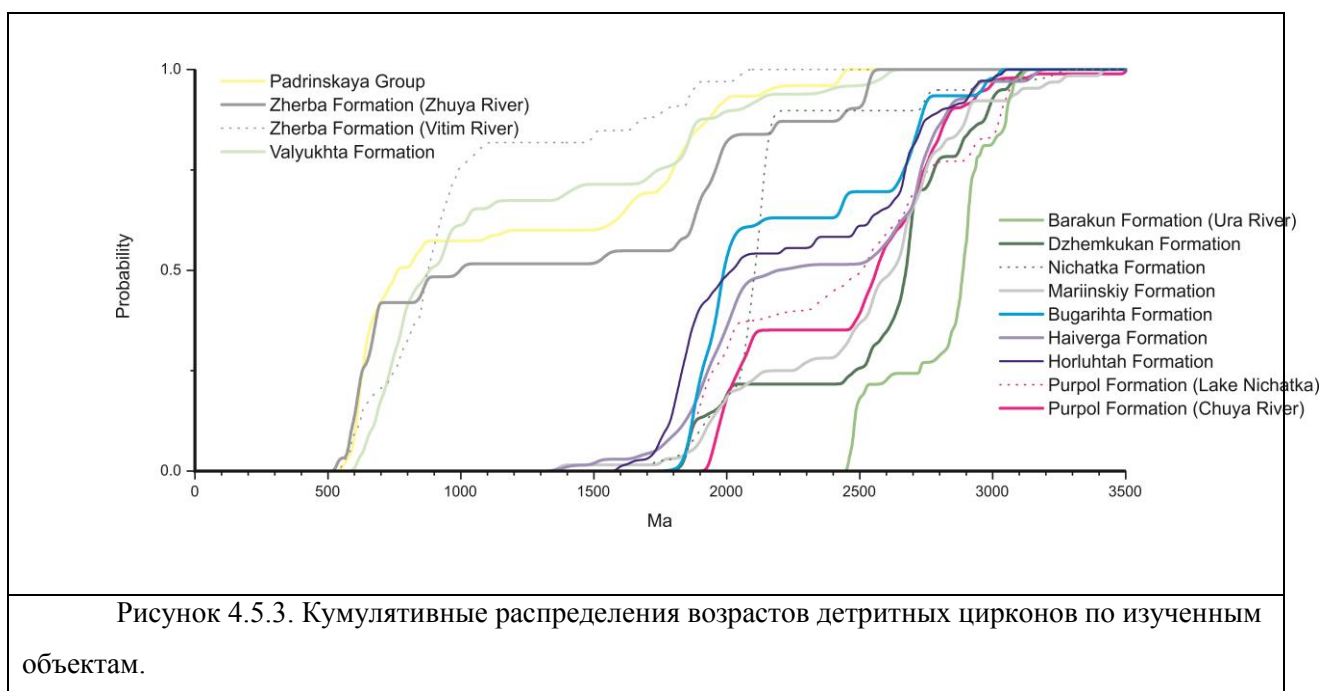
Геохронологические результаты

В ходе исследования были получены изотопные датировки по цирконам из пурпольской, хорлухтахской, хайвергинской, бугарихтинской, мариинской, джемкуканской (и ее фациальными аналогами - большепатомской и ничатской свитами), баракунской, валюхтинской, уринской и жербинской свит из осадочного разреза Байкало-Патомской окраины Сибирской платформы, из вулканогенно-осадочной падринской серии Байкало-Муйского пояса (590 млн.лет, [Рыцк и др., 2004]), из раннекарбоновых эмяксинской (центр Сибирской платформы) и точерской (Байкало-Муйский пояс) свит. В общей сложности, было анализировано 1419 обломочных циркона, из которых 970 использовались для выполнения геологических интерпретаций.

Изотопно-геохронологические анализы детритовых цирконов выполнялись в лаборатории Калифорнийского университета в Санта Крузе (США) с использованием масс-

спектрометра с индуктивно связанной плазмой Thermo Element XR с магнитным сектором. Для абляции цирконов использовался лазер Photon Machines Analyte 193.

Нижние свиты Байкало-Патомского разреза, от пурпольской до баракунской свиты, включительно, содержали в основном древние – архейские и палеопротерозойские – обломочные цирконы (рис. 4.5.3., 4.5.4.), а также малое количество мезопротерозойских зерен. Спектры распределений возрастов детритных цирконов в этих свитах являлись схожими со спектрами, полученных по древним кристаллическим породам Сибирского кратона (нижняя диаграмма на рис. 4.5.4.), что позволяет сделать вывод о местных – сибирских – источниках сноса на момент осадконакопления. Распределения возрастов цирконов для четырех свит – бугарихтинской, пурпольской, большепатомской и хорлухтахской, не показали значимых отличий от (синтезированного) распределения возрастов магматических цирконов из фундамента Сибири [Rojas-Agramonte et al., 2011].



Смена источников с сибирских на внерегиональные произошла между накоплением баракунской и валюхтинской свит (рис. 4.5.4., 4.5.5.).

В валюхтинской свите раннепротерозойские и архейские детритные цирконы играют подчиненную роль по отношению к неопротерозойским зернам. Кластер из самых молодых зерен в районе 610 млн.лет служит древним ограничением возраста осадконакопления и дает представление о времени начала взаимодействия структур Центрального Азиатского складчатого пояса (ЦАСП) с Сибирским кратоном. Тест Колмогорова-Смирнова показал хорошее соответствие между валюхтинской и хомолхинской (Бодайбинский синклиний) свитами, подтверждая региональную корреляцию разрезов, предложенную Н.М. Чумаковым с соавторами [Чумаков и др., 2007].

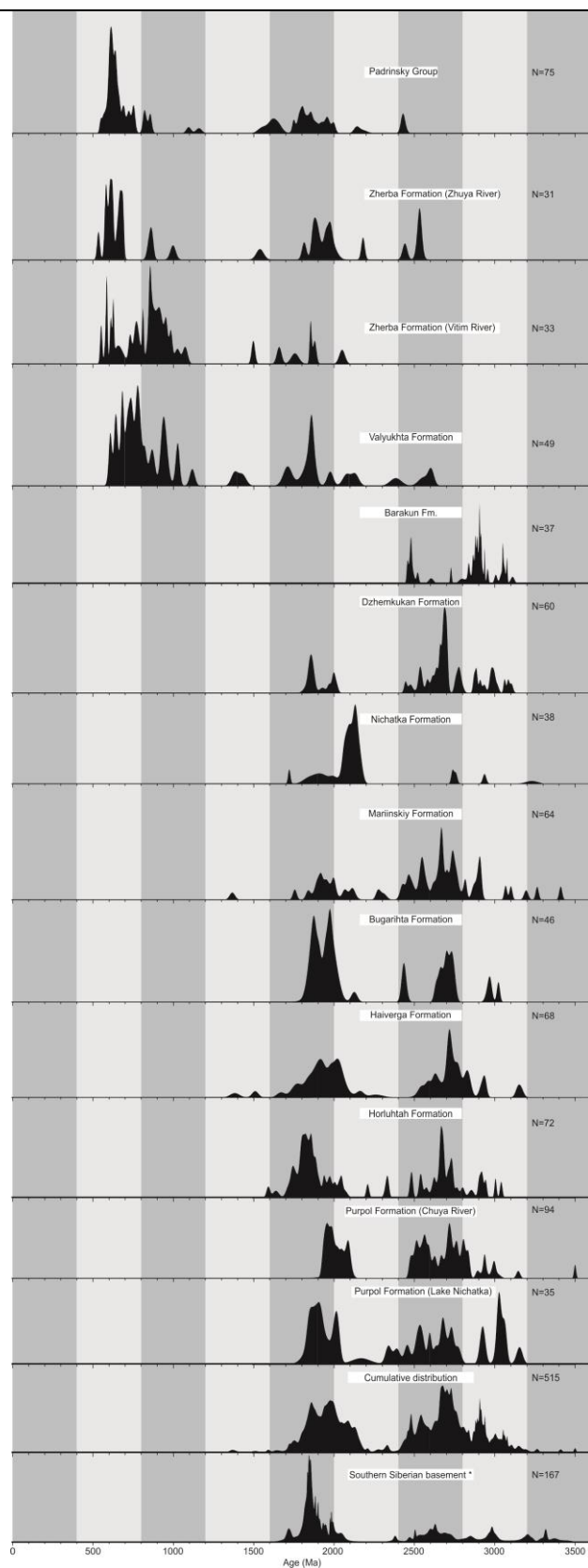


Рисунок 4.5.4. Вероятностные распределения возрастов детритных цирконов по всем изученным образцам.

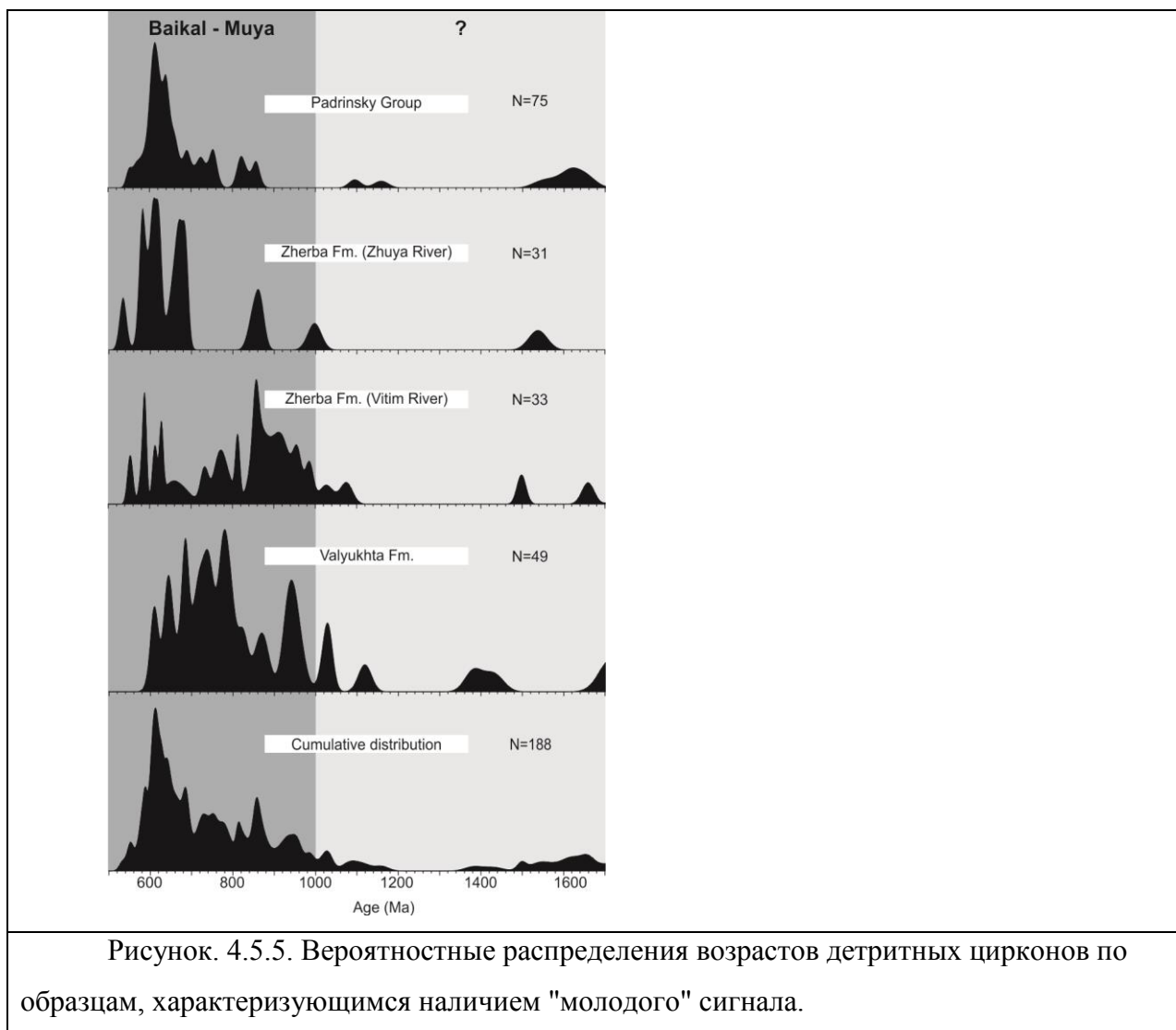


Рисунок. 4.5.5. Вероятностные распределения возрастов детритных цирконов по образцам, характеризующимся наличием "молодого" сигнала.

Неопротерозойские цирконы также доминируют и в вышележащей жербинской свите (рис. 4.5.5), свидетельствуя о продолжающемся надвиге структур ЦАСП. Тест Колмогорова-Смирнова свидетельствует об отсутствии статистически значимых отличий между возрастными распределениями в жербинской и валюхтинской свитах, из чего можно сделать вывод о том, что источник сноса обломочных цирконов не менялся в течение накопления этих двух свит.

Обломочные цирконы из близкой по возрасту (590 млн.лет) вулканогенно-осадочной падринской серии, расположенной со стороны складчатого пояса, имеют сходные распределения возрастов с валюхтинской и жербинской свитами (рис. 4.5.3), усиливая связь между Байкало-Патомским осадочным бассейном и структурами ЦАСП.

Место Сибирского кратона в мезопротерозойском суперконтиненте Родиния

Палеомагнитные данные и датировки обломочных цирконов из юго-восточной [Rainbird et al., 1998] и юго-западной [Powerman et al., 2015] окраин Сибирской платформы позволили ряду авторов сформулировать гипотезу о соседстве юга Сибири и севера Лаврентии в составе суперконтинента Родиния [Rainbird et al., 1998, Павлов и др., 2002 и др.]. Попробуем рассмотреть полученные данные на предмет согласованности с данной гипотезой.

Самые древние - довендские свиты содержат в себе преимущественно палеопротерозойские и архейские обломочные цирконы, источниками которых, вероятнее всего, являлся кристаллический фундамент Сибири. Отсутствие детритных цирконов с уникальными «лаврентийскими» возрастами (например, соответствующих Гренвильской орогении: 0.9-1.3 млрд.лет) не подтверждает (хотя и не опровергает) гипотезу о близком местонахождении юга Сибирского кратона с севером Лаврентии в составе суперконтинента Родиния. Количество единичных мезопротерозойских (нетипичных для Сибирского кратона возрастов) зерен слишком мало, чтобы делать обоснованные предположения об источниках их сноса. Но, так или иначе, в характерный для Лаврентии «гренвильский» интервал не попало ни одно зерно.

Следует, однако, подчеркнуть, что абсолютный возраст осадконакопления нижних свит Байкало-Патомского разреза неизвестен, и не исключен вариант, при котором разрез начал накапливаться уже после распада Родинии. В таком случае, отсутствие экзотических цирконов в нижних свитах является ожидаемым.

Региональные стратиграфические корреляции

Полученные геохронологические данные позволили нам разделить осадочный разрез Байкало-Патомской окраины платформы на два домена: нижний, для которого источниками обломочного материала являлись исключительно местные, «сибирские» породы и верхний, в породах которого значительный вклад вносили аккрецированные террейны ЦАСП. Горизонт, разделяющий домены, лежит в промежутке между баракунской и валухтинской свитами.

Подобный характер наблюдается и для других разрезов южных окраин Сибирской платформы [Гладкочуб и др., 2013; Meffre et al., 2008].

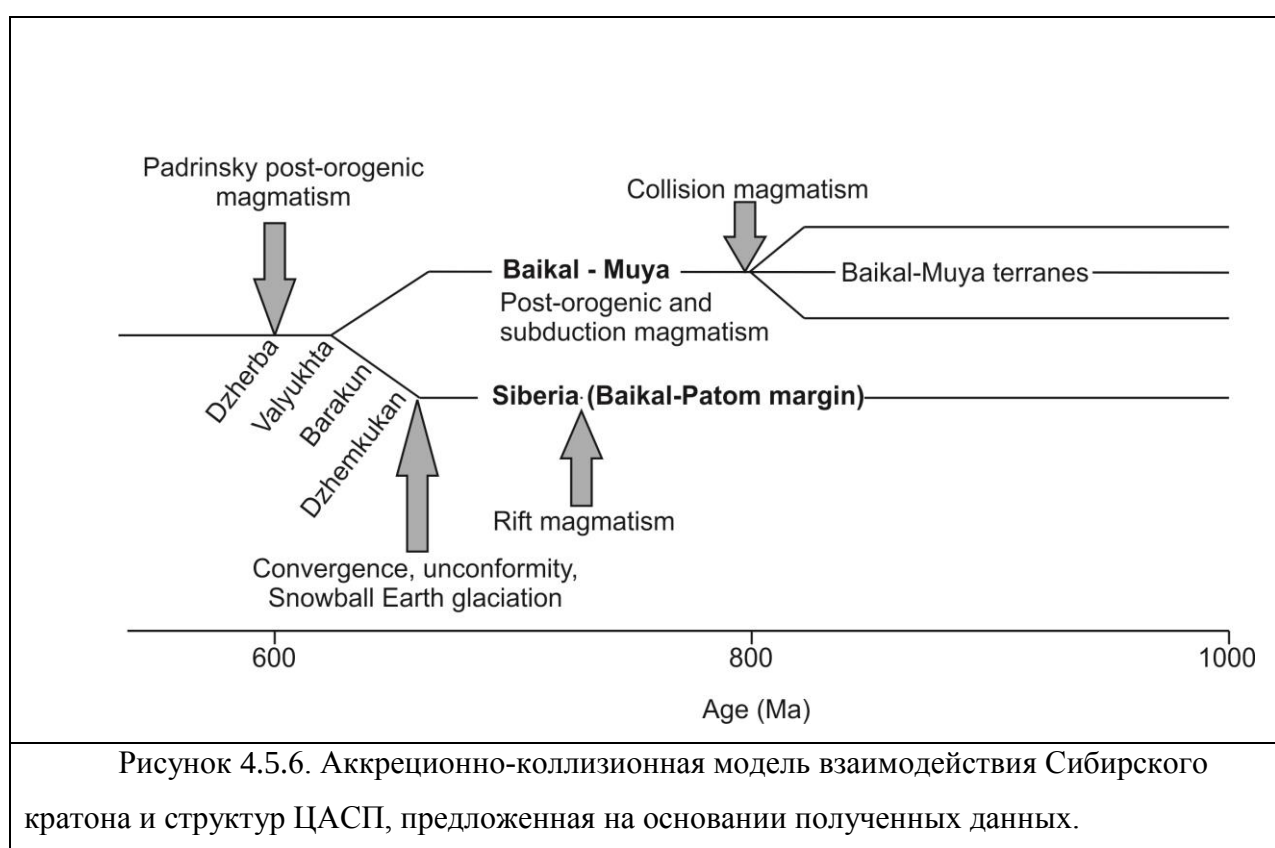
Учитывая повторяемость результатов, представляется возможным использовать критерий наличия/отсутствия неопротерозойских обломочных цирконов в докембрийских осадках для корреляции разрезов южных окраин Сибирской платформы.

Байкало-Патомская окраина Сибири в карбоне

Полученные данные по эмяксинской и точерской свитам свидетельствуют о том, что в раннем карбоне БМП представляла собой источник обломочных цирконов, которые сносились древней трансконтинентальной рекой «Палеовилуем», впадающей в образованное Вилуйским рифтом море.

Модель тектонического развития Байкало-Патомской области

Синтез геохронологических и палеомагнитных данных: литературных и полученных в результате работ по Проекту, позволили сформулировать тектоническую модель (рис. 4.5.6., 4.5.7.) эволюции Байкало-Патомской окраины Сибирского кратона в позднем протерозое и палеозое.



Основные положения этой модели представлены ниже:

800 млн. лет: исходя из возрастов внедрения гранитоидов и метаморфизма [Рыцк и др., 2011], в это время произошла амальгамация Байкало-Муйского составного террейна.

? - 635 млн.лет: Байкало-Патомский бассейн представлял собой пассивную окраину Сибири. Основной снос обломочного материала происходил со стороны кратона. Неясными остаются источники единичных несибирских цирконов с возрастaми 1.67–1.37 млрд лет.

635 млн. лет: это время соответствует глобальному оледенению (событие «Snowball Earth»), во время которого образовались тиллиты джемкуканской свиты и ее аналогов.

Несогласие, проходящее по подошве этой свиты, мы интерпретируем как начало взаимодействия между породами Байкало-Патомского бассейна с Байкало-Муйским составным террейном.

610 млн. лет: к этому времени расстояние между Байкало-Муйским террейном и Байкало-Патомской окраиной Сибири сократилось настолько, что террейн стал основным источником сноса детритных цирконов. Байкало-Патомская окраина превратилась в бассейн закрытого типа и располагавшийся в приэкваториальных широтах. Субдукция, исходя из отсутствия магматических пород на сибирской окраине, имела направленность в сторону ЦАСП.

600 млн. лет: произошла окончательная коллизия Байкало-Муйского составного террейна с южной окраиной Сибири. Коллизия маркируется сшивающими гранитоидами: Каларским и Онкологитским [Рыцк и др., 2009].

Поздний девон: начало раскрытия Вилуйского рифта приводит к внедрению комплекса базитовых интрузий в северные части Забайкальского сегмента составного Сибирского континента.

Ранний-средний карбон. Активная фаза вилуйского рифтогенеза приводит к компрессии внутри Забайкальского сегмента [Шацилло и др., 2014]; происходит формирование ранней, синтектонической фазы внедрения Ангаро-Витимского батолита. Забайкалье представляет собой топографическую возвышенность с системой гор и межгорных впадин, в которых накапливаются молассовые отложения. Забайкалье в это время является источником обломочных цирконов, сносимых как в межгорные впадины, так и попадающие в Вилуйский бассейн благодаря трансконтинентальной речной системе.

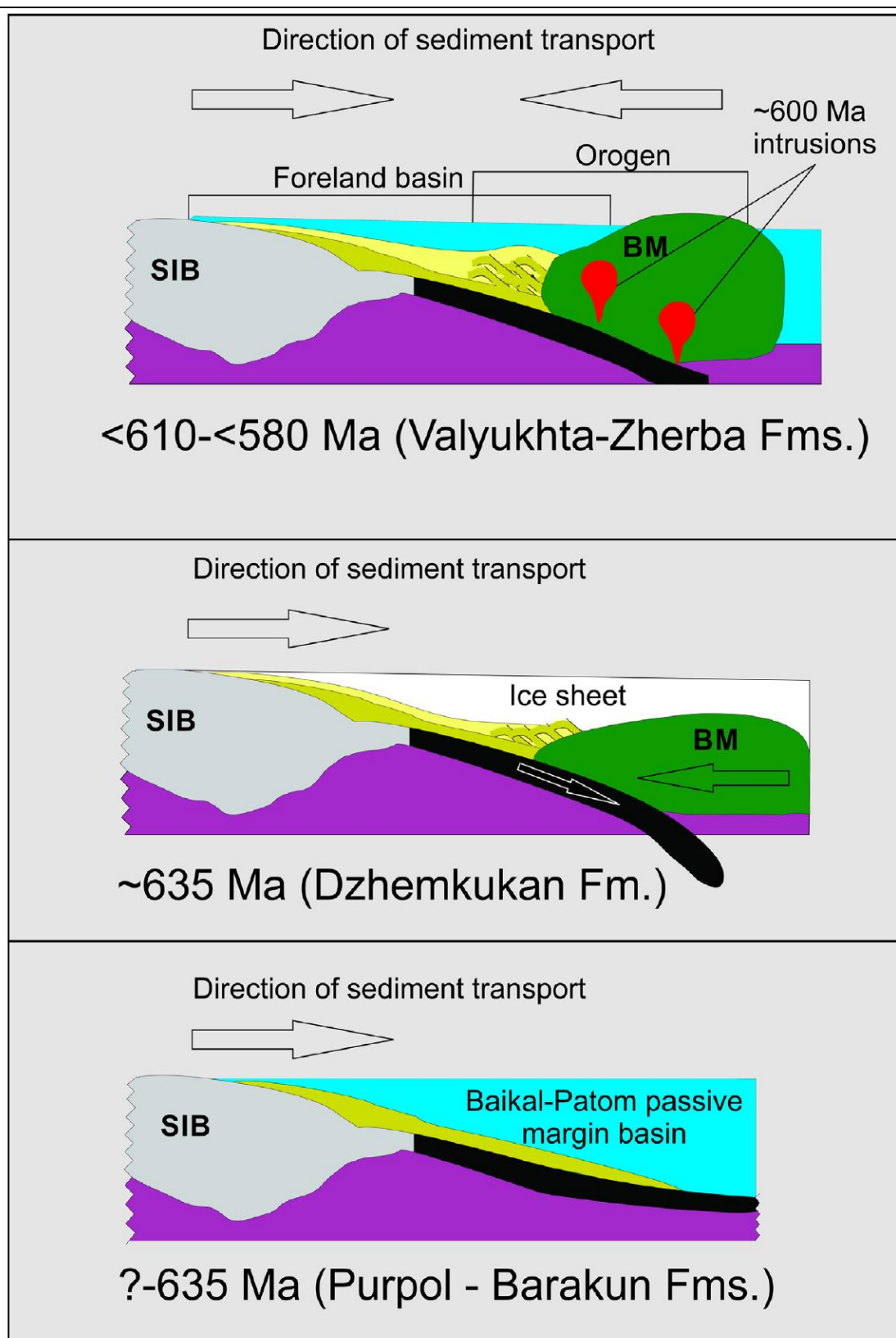


Рисунок 4.5.7. Аккреционно-коллизийная модель взаимодействия Сибирского крата и структур ЦАСП, предложенная на основании полученных данных.

Средний карбон-ранняя пермь (~290 млн лет). Коллапс Патомско-Забайкальского орогена. К этому времени образовался основной объем Ангаро-

Витимского батолита, приведшего к перемагничиванию позднедокембрийских пород Патомского комплекса и девонских интрузивов жаровского комплекса. В ранней перми Сибирский континент находился на широтах, близких к современным: между 48° и 72° северной широты [Шацилло и др., 2014].

Выводы.

Анализ опубликованных и полученных в ходе настоящей работы палеомагнитных и геохронологических данных позволил получить серьезные ограничения на геологическую историю Байкало-Патомской складчатой области и предложить современную модель, описывающую тектоническую эволюцию региона в позднем докембрии - палеозое.

Заключение.

В 2014-2016 гг. под научным руководством Ведущего Ученого Ива Галле выполнялись исследования по Проекту “Эволюция геомагнитного поля и взаимодействие планетарных оболочек”. Для реализации этого проекта на базе Института Физики Земли РАН была организована лаборатория Археомagnetизма и эволюции магнитного поля. В состав лаборатории вошли, как уже известные исследователи, так и молодые сотрудники, только начинающие свою научную карьеру.

Перед Проектом стояли следующие основные задачи:

1. Создание новой лабораторной инфраструктуры и разработка новых методов;
2. Построение опорных кривых палеогеомагнитных вариаций геомагнитного поля для различных регионов России и разработка глобальной модели магнитного поля голоцена;
3. Изучение эволюции магнитного поля Земли в фанерозое и докембрии;
4. Изучение геодинамической эволюции Северной Евразии в фанерозое и позднем докембрии.

Все основные задачи Проекта успешно решены.

Создана современная археомagnetная лаборатория, оборудованная передовой аппаратурой, позволяющей выполнять высокоточные исследования археологических артефактов и определять по ним напряженность древнего геомагнитного поля. Из молодых сотрудников Лаборатории подготовлен персонал, владеющий передовыми методами археомagnetных исследований и обладающий собственным (приобретенным в ходе выполнения Проекта) опытом решения археомagnetных задач. После установки и запуска трехосного магнитометра “Triax”[®], которые планируется осуществить в 2017-2018 гг., Лаборатория войдет в число лучших археомagnetных лабораторий мира.

В ходе исследований по теме Проекта получены следующие основные результаты:

1. Разработано и реализовано в коде программное обеспечение для управления автоматическим измерительным комплексом на базе криогенного магнитометра «Храмов-Палеомаг». В результате, существенно повышена стабильность и надежность работы комплекса, расширены его измерительные возможности;
2. Приобретена и запущена в работу измерительная система MicroMagTM 3900 Series Vibrating Sample Magnetometer (VSM) производства Princeton Measurements Corporation (США), позволяющая с высокой точностью и высокой производительностью выполнять широкий спектр петромагнитных исследований. Для этого прибора разработан алгоритм, позволяющий выполнять разложения коэрцитивных спектров с целью выделения

основных носителей намагниченности в осадочных разрезах, донных колонках озерных и океанических отложений. На основе этого алгоритма разработана программа, применение которой дает возможность проследить вариации содержания и свойств носителей намагниченности в разрезах на протяжении времени их формирования, с последующей их интерпретацией в терминах палеоклиматологии и палеоэкологии.

3. Проведена серия экспериментов, которые позволили оценить перспективы широко обсуждаемого метода регидроксилационного датирования (RHX). Получены результаты, которые указывают на существование серьезных ограничений для применения этого метода при датировании археологических артефактов.

4. Выполнено экспериментальное и теоретическое исследование свойств термомеханической намагниченности (TCRM), возникающей при изотермическом отжиге образцов горных пород, содержащих титаномagnetиты. Показано, что приобретение TCRM происходит на стадии преимущественно однофазного окисления и может происходить в течение очень короткого (в геологических масштабах) интервала времени. Показано, что данные по палеонапряженности, полученные по методике Телье-Коэ на образцах, содержащих TCRM, могут давать существенное занижение величины древнего поля. По экспериментальным данным и по результатам численного моделирования выполнена количественная оценка степени занижения величины палеонапряженности.

5. Изучены факторы, влияющие на свойства синтезированных гетитов. Выявлена зависимость размеров зерен гетита и степени его раскристаллизованности от условий эксперимента. Показано, что, хотя сами частицы гетита, осажденные из природных растворов, могут не вносить существенный вклад в формирование естественной намагниченности осадочных пород, их последующая дегидратация может приводить к образованию устойчивых магнитных фаз, свойства которых будут зависеть от свойств исходного гетита. Такой процесс может рассматриваться как один из вероятных при образовании естественной остаточной намагниченности красноцветов и должен учитываться при интерпретации палеомагнитных результатов.

6. Выполнена проверка согласованности результатов, получаемых статистическими и лабораторными методами оценки занижения наклонения в осадочных породах. Показано, что в ряде случаев, в зависимости от литологической характеристики пород, коэффициент занижения наклонения может достигать аномально низких значений.

7. Разработан и протестирован новый экспериментальный протокол по определению напряженности магнитного поля для коллекций, где наблюдается сильное влияние скорости создания термоостаточной намагниченности на конечный результат определения палеонапряженности.

8. Разработан оригинальный алгоритм, позволяющий генерировать распределения и временные последовательности палеомагнитных направлений для заданных моделей геомагнитного поля с заданным набором членов сферического гармонического разложения. На основе этого алгоритма создано ПО и инструкция по его использованию для широкого круга исследователей, работающих в области геомагнетизма.

9. На основе WEB-платформы – ScanEx Web Geomixer, ArcGIS Online создан итоговый ГИС-проект, включающий полученные в ходе работ по Проекту результаты мультидисциплинарных исследований, публикации и характеристику изученных объектов.

10. Отобраны и изучены колонки донных отложений ряда озер европейской части России. На основе полученных данных, для каждого из озер построены временные модели накопления осадков и дана оценка скоростей осадконакопления. Определены климатозависимые петромагнитные параметры, характеризующие влажность, температурные характеристики, изменения солености, геохимических условий осадконакопления и др. По вариациям этих параметров выполнена реконструкция голоценовых климатических изменений в соответствующих регионах. По петромагнитным параметрам выполнена корреляция палеомагнитных записей изученных донных колонок и построены геомагнитные мастер-кривые для голоцена для озер Плещеево и Рубское. Полученные мастер-кривые существенно пополняют геомагнитную базу данных (БД) по голоцену Центральной России и Приуралья и, будучи сопоставлены с опубликованными лимномагнитными данными по озерам Восточной и Западной Европы, позволяют определить характерные особенности, описывающие изменения геомагнитного поля голоцена в региональном масштабе и в масштабе Европы в целом.

11. Впервые с использованием современной методики и приборной базы получены палеонаправления геомагнитного поля позднего голоцена (последние 4000 лет) для 13 стратиграфических уровней вулканитов Камчатки. На этой основе построена опорная кривая вековых вариаций геомагнитного поля Камчатки для этого времени. Выявлены периоды быстрой смены направления геомагнитного поля, например, 1.8-2.1 тыс. лет назад. Полученные результаты существенно наращивают геомагнитную БД для позднего голоцена Северной Пацифики и могут быть использованы при региональной корреляции позднеголоценовых вулканических событий в Центрально-Камчатской депрессии.

12. Выполнен значительный объем археомагнитных исследований в Европейской части России и на Среднем Востоке. По их результатам:

а. Показано, что в интервале времени между XII и XVIII вв н.э. на Северо-Западе России отсутствовали сильные и быстрые вариации геомагнитного поля. Эволю-

ция напряженности геомагнитного поля здесь в это время характеризовалась нисходящим трендом, на который накладывается несколько пиков небольшой амплитуды, каждый длительностью около 100 лет;

b. Показано, что значения палеоинтенсивности, определенные по новгородским объектам, систематически меньше таковых, рассчитанных из моделей. Это означает, что современные глобальные модели геомагнитного поля все еще недостаточно точны для того, чтобы предсказывать значения элементов геомагнитного поля регионов слабо покрытых археомагнитными определениями;

c. Показано, что на территории Татарстана между X и XIV вв н.э. существовала крупная геомагнитная аномалия, которая постепенно угасала (уходила) в течение последних нескольких столетий вплоть до XVIII в.;

d. Построены региональные археомагнитные кривые эволюции напряженности геомагнитного поля, которые значительно детализируют представления об эволюции геомагнитного поля VII и VI тысячелетий до н.э. на территории Передней Азии и существенно уточняют археологическую информацию по древнейшим памятникам человеческой цивилизации;

e. Выявлены эпизоды быстрых (десятки – первые сотни лет) вариаций напряженности геомагнитного поля на территории Ближнего Востока. Выявлен и подтвержден пик напряженности геомагнитного поля в этом регионе ~ 5200 лет до н.э.; подтверждена выявленная ранее на сирийских объектах тенденция снижения напряженности геомагнитного поля на протяжении 7-6 тысячелетий до н.э.;

f. Существенно уточнены возрасты разрезов культурных отложений археологических памятников, находящихся на территории современной Сирии (Телль Халула, Телль Мазаикх) и Ирака (Ярым Тепе 2).

13. С опорой на археомагнитные данные, описывающие эволюцию дипольного момента геомагнитного поля в течение последних тысячелетий, показано, что частота солнечных максимумов и минимумов модулируется так называемыми циклами Холстатта с периодом около 2400 лет;

14. На основе изучения статистических характеристик распределения величин палеонапряженности в международной БД показано, что 10-15% определений поля ошибочны. Это связано, скорее всего, с ошибкой идентификации термоостаточной намагниченности, по которой, единственно, возможно корректное определение палеонапряженности. Предложена процедура оценки того, насколько декларируемые величины ошибок измерения в рассматриваемых БД соответствуют реально присутствующим в данных неточностям;

15. Изучены точность и устойчивость существующих моделей геомагнитного поля относительно коррекций имеющихся палеомагнитных БД при внесении в них результатов новых измерений. Выявлены недостатки и ограничения имеющейся методологии построения моделей. С учетом этого создан новый, свободный от технологических ограничений и вычислительных ошибок, алгоритм, позволяющий работать с большими объемами данных и варьировать типы спектрального преобразования;

16. Создан и отлажен новый и быстрый алгоритм определения пространственного спектра магнитного поля по типичным данным архео- и палеомагнетизма, имеющий существенные преимущества по сравнению с предшествующими алгоритмами. При помощи нового алгоритма проведено детальное исследование возможностей построения моделей для голоцена. Выяснены пределы точности таких моделей. Показано, что, за малым исключением, существующие данные не позволяют сколь-либо надежно определять динамику недипольных компонент в голоцене;

17. Выполнен расчет серии рабочих моделей геомагнитного поля голоцена, отвечающих разным модификациям входных данных. Выявлено несколько источников нестабильности моделей, вычисляемых в рамках традиционного подхода. С учетом этих результатов разработаны новые модификации алгоритма, последовательно приближающие к получению корректных оценок точности спектрального преобразования реальных данных. Разработан аппарат, позволяющий оценить влияние свойств используемой БД на точность модели.

18. Для ряда временных уровней геологической истории выполнено определение амплитуды вековых вариаций, выполнен глобальный анализ данных, имеющихся для времени, предшествующему 5 млн. лет назад. Полученные данные позволяют сделать следующие выводы.

а. Амплитуда вековых геомагнитных вариаций на рубеже палеозоя и мезозоя была примерно того же уровня, что и последние 5 млн. лет. В целом, выполненный глобальный анализ вековых вариаций, записанных в разновозрастных вулканических толщах фанерозоя, указывает на то, что их наблюдаемые амплитуды не совместимы ни с одной из ранее предлагавшихся моделей и, по-видимому, не коррелируют с частотой геомагнитных инверсий.

б. удлинение распределений палеомагнитных направлений, предлагавшееся ранее для описания вариаций геомагнитного поля, не является статистически устойчивой величиной при реально достижимых объемах коллекций.

с. геомагнитное поле во время позднепалеозойского каменноугольно-пермского суперхрона Киама характеризовалось высокой степенью дипольности и низкой амплитудой вековых геомагнитных вариаций.

19. Модифицирована и существенно дополнена международная БД по палеонапряжённости (http://www.brk.adm.yar.ru/palmag/index_e.html). Показано, что с большой степенью вероятности в периоды низкого поля, существовавшие в отдельные периоды протерозоя и в девоне, геомагнитное поле носило выраженный мультипольный характер.

20. Выполнена серия определений напряженности геомагнитного поля в протерозое и на границе архея и протерозоя. Показано, что ~1850 млн. лет назад средняя величина напряженности поля была почти втрое меньше его средней величины в кайнозое. Это обстоятельство, в совокупности с другими литературными данными по палеонапряжённости и частоте инверсий в протерозое, может рассматриваться как довод в пользу гипотезы о позднем возникновении твёрдого внутреннего ядра Земли. С другой стороны для времени ~2505 млн. лет получены качественные данные, указывающие на существование в это время необычайно сильного геомагнитного поля, превышающего его современное значение примерно в полтора раза. Новые данные, наряду с уже опубликованными результатами показывают, что напряженность геомагнитного поля в протерозое изменялась немонотонно и, в настоящее время, эволюция этого параметра не может быть напрямую связана с возникновением и ростом внутреннего ядра Земли.

21. Подтверждена гипотеза о сложном характере поведения магнитного поля Земли в девоне. Обнаруженные особенности палеомагнитной записи указывают на то, что поле на протяжении значительной части этого периода геологической истории было существенно недипольным.

22. Данные, полученные по объектам юрского возраста, указывают на относительно низкую величину поля в это время, что противоречит гипотезе связи величины палеонапряжённости с частотой инверсий

23. Получены магнитостратиграфические данные, указывающие на аномально высокую частоту инверсионного процесса вблизи границы докембрия и палеозоя, отражающую гиперактивное состояние геомагнитного поля в это время.

24. Получено доказательство существования геомагнитного суперхрона на границе мезо- и неопротерозоя, оценена его длительность. Получены новые данные о существовании в протерозое резких переходов между инверсионным и суперхронным режимами функционирования геодинамо.

25. Для описания эволюции инверсионного процесса предложена модель, которая предполагает существование трех рабочих режимов в инверсионном процессе, а

именно: 1) нормального инверсионного; 2) неинверсионного “суперхронного”; 3) гипер-активного инверсионного. Модель также предполагает, что переход от одного режима работы геодинамо к другому может совершаться внезапно (в масштабах первых миллионов лет), при этом вероятность перехода от одного режима к другому может напрямую зависеть от характера распределения теплового потока на границе ядро–мантия. При этом до формирования внутреннего ядра в докембрии такие переходы могли быть более частыми из-за более сильного влияния термальных условий на границе ядро–мантия на работу геодинамо.

26. По результатам выполненных магнитостратиграфических исследований серии опорных осадочных разрезов Западной, Центральной и Восточной Европы разработаны или уточнены магнитостратиграфические схемы пермо-триасовых отложений южной Франции, центральной Германии, Среднего Поволжья, Оренбургской области, бассейна Северной Двины, получены новые позднепермские-раннетриасовые палеомагнитные полюсы Восточно-Европейской платформы и «стабильной Европы». Создана БД, включающая в себя все палеомагнитные определения, полученные по пермо-триасовым осадочным и магматическим породам этого региона. Анализ данных, заключенных в этой БД, показал, что вклад зональных недипольных компонент в геомагнитное поле на границе палеозоя-мезозоя суммарно составлял не более 10%.

27. Получены новые палеомагнитные полюсы, которые существенно уточняют характер дрейфа Сибирской платформы в конце докембрии. Предложены две альтернативные модели неопротерозойского сегмента сибирской кривой кажущейся миграции полюса. Получены новые ограничения на конфигурацию суперконтинента Родиния и на взаимное положение СП и Лаврентии в интервале 900-750 млн.лет. Подтверждена существующая схема корреляции основных опорных разрезов рифея.

28. По верхнему венду Южного Урала и Сибирской платформы получены новые палеомагнитные полюсы, позволяющие реконструировать палеогеографическое положение Восточно-Европейской и Сибирской платформ вблизи границы докембрия и фанерозоя, сделать новый важный шаг в разработке кривых КМП для этих кратонов.

29. Получены новые палеомагнитные данные, которые заставляют: а) пересмотреть взгляды на эволюцию и возраст магматизма в западной части Центрально-Азиатского складчатого пояса; б) предположить, что формирование эпипалеозойского Уральского орогена происходило без заметного сближения Восточно-Европейской платформы и Казахстана.

30. На основе синтеза палеомагнитных, геохронологических, геохимических, седиментологических и палеонтологических данных по рифею, венду и нижнему палео-

зою Енисейского кряжа разработаны модернизированные модели строения и тектонического развития этого региона в позднем докембрии – начале фанерозоя. В частности, показано, что ключевым моментом модели строения и эволюции позднедокембрийско-раннепалеозойской эволюции для Енисейского кряжа является произошедшее в конце венда осложнение крупно-амплитудно продольными сдвиговыми дислокациями позднедокембрийской пассивной западной окраины Сибирской платформы, а также, что Центрально-Ангарская зона автохтонна (параавтохтонна) по отношению к Сибирской платформе.

31. На основе синтеза палеомагнитных, геохронологических, геохимических и палеонтологических данных получены изотопные, палеогеографические, палеотектонические ограничения на историю формирования Байкало-Патомской области, разработана современная модель, описывающая тектоническую эволюцию региона в интервале времени 800-300 млн. лет назад.

32. С использованием полученных палеомагнитных данных выполнено тестирование гипотезы Шенгера-Буртмана-Натальина (1993), описывающей формирование Центрально-Азиатского складчатого пояса. Показано, что имеющиеся палеомагнитные определения по венду и раннему палеозою Сибирской и Восточно-Европейской платформ допускают, что эти континентальные блоки в конце докембрия – самом начале палеозоя могли быть обращены друг к другу своими современными северными окраинами, что хорошо согласуется с базовыми положениями тестируемой гипотезы.

Таким образом, все задачи, поставленные перед Проектом на 2014-2016 гг., успешно решены. Часть результатов, полученных в ходе выполнения Проекта, опубликована в ведущих отечественных и международных журналах, представлена участниками Проекта в многочисленных докладах на научных отечественных и международных конференциях. Другая часть в настоящее время готовится к печати. Полученные результаты в совокупности представляют собой значительный шаг на пути изучения эволюции магнитного поля Земли и истории геологического развития Северной Евразии и планеты в целом.

Литература.

- Ali, M. Oda H., Hayashida A., Takemura K., Torii M. (1999), Holocene palaeomagnetic secular variation at Lake Biwa, central Japan., *Geophys. J. Int.* 136, 218-228
- Aubert J., Labrosse S. and Poitou C., 2009. Modelling the palaeo-evolution of the geodynamo // *Geophys. J. Int.*, v. 179(3), pp. 1414-1428, doi:10.1111/j.1365-246X.2009.04361.x.
- Bazhenov M.L., Levashova N.M., Meert J.G., Golovanova I.V., Danukalov K.N., Fedorova N.M. Late Ediacaran magnetostratigraphy of Baltica: Evidence for Magnetic Field Hyperactivity? // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2016.
- Bazhenov M.L., Shatsillo A.V. Late Permian palaeomagnetism of Northern Eurasia: data evaluation and a single-plate test of the geocentric axial dipole model // *Geophysical Journal International*. 2010. V.180. P. 136–146.
- Bazhenov M.L., Van der Voo R., Levashova N.M. and Dominguez A.R. Late Devonian palaeomagnetism of the North Tien Shan, Kyrgyzstan: can secular variation vary on a short timescale? *Geophys. J. Int.* (2013) 193, 635–649. DOI: 10.1093/gji/ggt011
- Ben-Yosef, E., Tauxe, L., Levy, T.E., Shaar, R., Ron, H., Najjar, M., 2009. Geomagnetic intensity spike recorded in high resolution slag deposit in southern Jordan. *Earth Planet. Sci. Lett.* 287, 529–539
- Biggin A.J., Douwe J.J. van Hinsbergen, Cor G. Langereis, Gijs B. Straathof, Martijn H.L. Deenen. Geomagnetic secular variation in the Cretaceous Normal Superchron and in the Jurassic. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 169 (2008) 3–19
- Biggin, A. J. et al. Possible links between long-term geomagnetic variations and whole-mantle convection processes. *Nature Geosci.* 5, 526–533 (2012)
- Bloxham J., Jackson A., 1989, Simultaneous Stochastic Inversion for Geomagnetic Main Field and Secular Variation 2. 1820-1980, *JGR*, 94, B11,15753-15769
- Bowen, P. K., Ranck, H. J., Scarlett, T. J., & Drelich, J. W. (2011). Rehydration/Rehydroxylation Kinetics of Reheated XIX-Century Davenport (Utah) Ceramic. *J. Am. Ceram. Soc.*, 94, 2585–2591
- Bronk Ramsey, C. (1995), Radiocarbon calibration and analysis of stratigraphy: The OxCal program. *Radiocarbon*, 37(2), 425-430
- Burlatskaya, S. P., Nachasova, I.E., Didenko, E. J., Shelestun, N. K., 1986. Archeomagnetic determinations of geomagnetic field elements. *Sov. Geophys. Comm. of the USSR Acad. of Sci.*, Moscow

Buslov M.M., I.Yu. Saphonova, T. Watanabe, O.T. Obut, Y. Fujiwara, K. Iwata, N.N.Semakov, Y. Sugai, L.V. Smirnova, A.Yu. Kazansky Evolution of the Paleo-Asian Ocean (Altai Sayan Region, Central Asia) and collision of possible Gondwana-derived terranes with the southern marginal part of the Siberian continent // *Geosciences Journal* Vol. 5, No. 3, p. 203-224, September 2001

Buylaert, J-P, Jain, M., Murray, A., Thomsen, K., Thiel, C., Sohbati, R., 2012. A robust feldspar luminescence dating method for Middle and Late Pleistocene sediments. *Int. J. of Quatern. Res.* 10.1111/j.1502-3885.2012.00248.x

Cai, S., Jin, G., Tauxe, L., Deng, C., Qin, H., Pan, Y., Zhu, R. 2016. Archaeointensity results spanning the past 6 kiloyears from eastern China and implications for extreme behaviors of the geomagnetic field. *PNAS* doi:10.1073/pnas.1616976114

Chenet A.L., Fluteau F., Courtillot V., Gerard M., Subbarao K.V. Determination of rapid Deccan eruptions across the Cretaceous-Tertiary boundary using paleomagnetic secular variation: Results from a 1200-m-thick section in the Mahabaleshwar escarpment // *J. Geophys. Res.* 2008. 113. B04101, doi:10.1029/2006JB004635

Churikova T.G., Gordeychik B.N., Edwards B.R., Ponomareva V.V., Zelenin E.A. The Tolbachik volcanic massif: A review of the petrology, volcanology and eruption history prior to the 2012-2013 eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research.* 2015. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2015.10.016

Coe R.S. and Glatzmaier G.A., Symmetry and stability of the geomagnetic field, *GRL*, v. 33, L21311, doi:10.1029/2006GL0279032006

Constable, C. 2011. Modelling the geomagnetic field from syntheses of paleomagnetic data. *Phys. Earth Planet. Int.* 187 (2011) 109 – 117

Creer, K.M. & Embleton, B.J.J., 1967. Devonian palaeomagnetic pole for Europe and N. America. *Nature*, 214(5083), 42-43, doi: 10.1038/214042a0

Creer, K.M. Geomagnetic secular variation recorded in the stable remanence of recent sediments / K.M. Creer, R. Thompson, L. Molyneux. *Earth and Planetary Science Letters* 14, 115-127, 1972

Creer, K.M. Geomagnetic secular variations 0-14 000yr BP as recorded by lake sediments from Argentina / K.M. Creer, D.A. Valencio, A.M. Sinito , P. Tucholka, J.F.A. Vilas. (1983), *Geophysical Journal - Royal Astronomical Society* 74 (1) , pp. 199-221

D. K. Nourgaliev, F. Heller, A. S. Borisov, et al., “Principal Features (Master Curve) of Geomagnetic Field Variations in Belorussia during the Last 12 Thousand Years,” *Russ. J. Earth Sci.* 7(2), 1–16 (2005)

- D. K. Nourgaliev, F. Heller, A. S. Borisov, et al., “Very High Resolution Paleosecular Variation Record for the Last 1200 Years from the Aral Sea,” *Geophys. Res. Lett.* 30(17) (2003)
- Daly, L., Le Goff, M., (1996), An updated and homogeneous world secular variation data base. 1. Smoothing of the archaeomagnetic results. *Phys. Earth Planet. Int.* 93, 159–190
- Domeier M., Rob Van der Voo, Trond H. Torsvik. Paleomagnetism and Pangea: The road to reconciliation // *Tectonophysics*. 2012. V.514–517. P.14–43
- Donadini, F., Korte, M., Constable, C.G. Geomagnetic field for 0–3 ka: 1. New data sets for global modeling. 2009. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 10 (6), Q06007
- Drager U., M. Preevot, T. Poidras, and J. Riisager, Single-domain chemical, thermochemical and thermal remanences in a basaltic rock, *Geophys. J. Int.*, 166, 12–32, 2006
- Driscoll and Olson. Polarity reversals in geodynamo models with core evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, 282(1-4):24–33, 2009
- Driscoll and Olson. Superchron cycles driven by variable core heat flow, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L09304, doi:10.1029/2011GL046808, 2011
- Driscoll. Simulating 2 Ga of geodynamo history, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 5680–5687, doi:10.1002/2016GL068858, 2016.
- Egli, R. (2004), Characterization of individual rock magnetic components by analysis of remanence curves. 2. Fundamental properties of coercivity distributions, *Physics and Chemistry of the Earth*, 29(13-14), 851-867
- Elston D.P., Enkin R.J., Baker J., Kisilevsky D.K. Tightening the Belt: Paleomagnetic_stratigraphic constraints on deposition, correlation, and deformation of the Middle Proterozoic (ca. 1.4 Ga) Belt_Purcell Supergroup, United States and Canada. *GSA Bulletin* 114. 2002. P. 619–638
- Ertepinar, P., Langereis, C.G., Biggin, A.J., Frangipane, M., Matney, T., Ökse, T., Engin, A., 2012. Archaeomagnetic study of five mounds from upper mesopotamia between 2500 and 700 BC: further evidence for an extremely strong geomagnetic field ca. 3000 years ago. *Earth Planet. Sci. Lett.* 357–358, 84–98
- Evans M.E., Pavlov V., Veselovsky R., Fetisova A. Late Permian paleomagnetic results from the Lodève, Le Luc, and Bas-Argens Basins (southern France): magnetostratigraphy and geomagnetic field morphology // *Physics of the Earth and Planetary Interiors* (2014). V. 237. P. 18-24. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pepi.2014.09.002>
- Fabian Karl, Valeriy P. Shcherbakov, Lina Kosareva, Danis Nourgaliev Physical interpretation of isothermal remanent magnetization end-members: New insights into the environmental history of Lake Hovsgul, Mongolia // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* Volume 17, Issue 11 November 2016 Pages 4669–4683

Fanajat G., Aidona E., Kondopoulou D., Camps P., Rathossi C., Poidras T. Archeointensities in Greece during the Neolithic period: New insights into material selection and secular variation curve. *Phys. Earth and Plan. Int.* 215 (2013) 29 – 42

Finlay, C.C., 2008. Historical variation of the geomagnetic axial dipole. *Phys. Earth Planet. Inter.* 170, 1-14

Fisher, R. Dispersion on a Sphere. 1953. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 217 (1130), 295-305

Fournier A., Gallet Y., Usoskin I., Livermore P., Kovaltsov G. The impact of geomagnetic spikes on the production rates of cosmogenic and ^{14}C and ^{10}Be in the Earth's atmosphere. *Geophys. Res. Lett.* 10.1002/2015GL063461

Gallet, Y. and Pavlov, V. (1996). Magnetostratigraphy of the Moyero river section (north-western Siberia): constraints on geomagnetic reversal frequency during the early Palaeozoic. *Geophysical Journal International* 125: 95-105.

Gallet, Y., D'Andrea, M., Genevey, A., Pinnock, F., Le Goff, M., Matthiae, P., 2014. Archaeomagnetism at Ebla (Tell Mardikh, Syria). New data on geomagnetic field intensity variations in the Near East during the Bronze Age. *J. Archaeol. Sci.* 42, 295–304

Gallet, Y., Genevey, A., Courtillot, V. On the possible occurrence of 'archaeomagnetic jerks' in the geomagnetic field over the past three millennia. *Earth and Planetary Science Letters* 214 (2003) 237 – 242

Gallet, Y., Hulot, G., Chulliat, A., Genevey, A., 2009b. Geomagnetic field hemispheric asymmetry and archeomagnetic jerks. *Earth Planet. Sci. Lett.* 284, 179–186

Gallet, Y., Molist, M., Genevey, A., Garcia, X. C., Thebault, E., Gomez, A., Le Goff, M., Robert, B., Nachasova, I. New Late Neolithic (c. 7000 – 5000 BC) archeointensity data from Syria. Reconstructing 9000 years of archeomagnetic field intensity variations in the Middle East. *Earth and Plan. Int.* 328 (2015) 89 – 103

Gallet, Y., Pavlov, V., Halverson, G.P., and Hulot, G., 2012. Toward constraining the long-term reversing behavior of the geodynamo: A new “Maya” superchron ~1000 Ma ago from the magnetostratigraphy of the Kartochka Formation (southwestern Siberia) // *Earth and Planetary Science Letters*, vv. 339–340, pp. 117–126

Genevey, A., Gallet, Y., Constable, C., Korte, M., Hulot, G., 2008. ArcheoInt: an upgraded compilation of geomagnetic field intensity data for the past ten millennia and its application to the recovery of the past dipole moment. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 9 (4), Q04038. <http://dx.doi.org/10.1029/2007GC001881>

Genevey, A., Gallet, Y., Jesset, S., Thébault, E., Bouillon, J., Lefèvre, A., Le Goff, M., 2016. New archeointensity data from French Early Medieval ceramic production (6th-10th cen-

tury AD). Tracing 1500 years of geomagnetic field intensity variations in Western Europe. *Phys. Earth Planet. Inter.* 257, 205-219

Genevey, A., Gallet, Y., Thébault, E., Jésset, S., Le Goff, M., 2013. Geomagnetic field intensity variations in Western Europe over the past 1100 years. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 14/8, 2858-2872

Gogorza, C.S.G. Geomagnetic secular variations over the last 6500 years as recorded by sediments from the lakes of south Argentina / C.S.G. Gogorza, A.M. Sinito, J.F. Vilas, K.M. Creer, H. Nuñez. 2000 *Geophysical Journal International* 143 (3) , pp. 787-798

Gubbins, D., Jones, A.L., Finlay, C.C., 2006. Fall in Earth's magnetic field is erratic. *Science* 312, 900-902

Hartmann, G., Genevey, A., Gallet, Y., Trindade, R., Etchevarne, C., Le Goff, M., Afonso, M., 2010. Archeointensity in Northeast Brazil over the past five centuries. *Earth Planet. Sci. Lett.* 296, 340–352

Heslop D. and M. Dillon Unmixing magnetic remanence curves without a priori knowledge // *Geophys. J. Int.* (2007) 170, 556–566 doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03432.x

Heslop, D., Dekkers, M.J., Kruiver, P.P. & van Oorschot, I.H.M., 2002. Analysis of isothermal remanent magnetization acquisition curves using the expectation-maximization algorithm, *Geophys. J. Int.*, 148, 58–64

Hulot, G. and Gallet, Y., Do superchrons occur without any palaeomagnetic warning?, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2003, vol. 210, pp. 191–201

Jackson, A., Jonkers, A., Walker, M., 2000. Four centuries of geomagnetic secular variation from historical records. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. A* 358, 957-990

Kirschvink J.L. The least-square line and plane and the analysis of paleomagnetic data. *Geophys. J.R. Astron. Soc.* 1980. V. 62. P. 699–718

Kirschvink J.L., R.L. Ripperdan, D.A. Evans Evidence for a Large-Scale Reorganization of Early Cambrian Continental Masses by inertial interchange True Polar Wander // *SCIENCE*, 1997, V.277, p.p.541-545

Kodama K. *Paleomagnetism of Sedimentary Rocks: Process and Interpretation*. September 2012. Wiley-Blackwell. 164 p.

Korte, M., Constable, C., 2011. Improving geomagnetic field reconstructions for 0– 3 ka. *Phys. Earth Planet. Interiors* 188, 247–259

Korte, M., Constable, C., Donadini, F., Holme, R., 2011. Reconstructing the Holocene geomagnetic field. *Earth Planet. Sci. Lett.* 312, 497–505

Korte, M., Constable, C.G., 2003. Continuous geomagnetic field models for the past 3000 years. *Phys. Earth Planet. Interiors* 140, 73–89

Korte, M., Constable, C.G., 2005. Continuous geomagnetic field models for the past 7 millennia: 2 CALS7K. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 6, Q02H16

Korte, M., Donadini, C., Constable, C.G., 2009. The geomagnetic Field for 0–3 ka, part II: a new series of time-varying global models. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 10, Q06008

Korte, M., Genevey, A., Constable, C.G., Frank, U., Schnepp, E., 2005. Continuous geomagnetic field models for the past 7 millennia: 1. A new global data compilation. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 6 (2), Q02H15

Kovacheva, M., Kostadinova – Avramova, M., Jordanova, N., Lanos, P., Boyadziev, Y. Extended and revised archeomagnetic database and secular variation curves from Bulgaria for the last eight millennia. *Phys. Earth. Plan. Int.* (2014) <http://dx.doi.org/10.1016/j.pepi.2014.07.002>

Kröner A., Demoux A., Zack T., Rojas-Agramonte Y., Jian P., Tomurhuu D., Barth M. Zircon ages for a felsic volcanic rock and arc-related early Palaeozoic sediments on the margin of the Baydrag microcontinent, central Asian orogenic belt, Mongolia // *Journal of Asian Earth Sciences* 42 (2011) 1008-1017

Kruiver Pauline P., Mark J. Dekkers, David Heslop Quantification of magnetic coercivity components by the analysis of acquisition curves of isothermal remanent magnetisation // *Earth and Planetary Science Letters* 189 (2001) 269-276

Kuzmichev A.B., Sklyarov E.V. The Precambrian of Transangaria, Yenisei Ridge (Siberia): Neoproterozoic microcontinent, Grenville-age orogen, or reworked margin of the Siberian craton? // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2016. V.115. P.419-441

Kuznetsov N.B., Belousova E.A., Alekseev A.S., Romanyuk T.V. New data on detrital zircons from the sandstones of Lower Cambrian Brusov Formation (White-Sea region, East-European craton): unraveling the timing of the onset of the Arctida-Baltica collision // *International Geology Review*. 2014. V.56, №16. P.1945-1963. DOI: 10.1080/00206814.2014.977968

Le Goff, M., Gallet, Y., 2004. A new three-axis vibrating sample magnetometer for continuous high-temperature magnetization measurements: applications to paleo- and archeointensity determinations. *Earth Planet. Sci. Lett.* 229, 31-43

Lee and Seung, 2001 Algorithms for Non-negative Matrix Factorization // Part of: *Advances in Neural Information Processing Systems* 13 (NIPS 2000)

Li and Kodama (2016) Detecting and Correcting for Paleomagnetic Inclination Shallowing of Sedimentary Rocks: A Review. *Front. Earth Sci.* 4:7. doi: 10.3389/feart.2016.00007

Licht A., G. Hulot, Y. Gallet, and E. Thébault, Ensembles of low degree archeomagnetic field models for the past three millennia. *Phys. Earth Planet. Inter.* 224, 38–67, 2013

Livermore P., Fournier A., Gallet Y., Cor-flow constrains on extreme archeomagnetic intensity changes. *Earth and Plan. Sci. Lett.* 387 (2014) 145 – 156

Lowrie Identification of ferromagnetic minerals in a rock by coercivity and unblocking temperature properties // *Geophysical Research Letters* Volume 17, Issue 2 February 1990 Pages 159–162

Lubnina N., Ernst R., Klausen M. and Söderlund U., 2010. Paleomagnetic study of Neo-Archean–Paleoproterozoic dykes in the Kaapvaal Craton // *Precambrian Research*, v. 183. No. 3. pp. 523-552

McElhinny M.W., McFadden P.L. Palaeosecular variation over the past 5 Myr based on a new generalized database // *Geophys. J. Int.* 1997. V. 131(2). P. 240–252

McFadden P. L., McElhinny M. W. Classification of the reversal test in palaeomagnetism. *Geophys. J. Int.* 1990. V. 103. P. 725–729

McFadden PL and McElhinny MW (1984) A physical model for paleosecular variation. *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society* 67: 19–33

Meffre S., R.R. Large, R.A. Scott, J.D. Woodhear, Z. Chang, S.E. Gillbert, L.V. Danyushevsky, V. Maslennikov, J.M. Hergt, 2008. Age and pyrite Pb-isotopic composition of the giant Sukhoi Log sediment-hosted gold deposit, Russia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, v.72, pp. 2377-2391

Metelkin D.V., Vernikovskiy V.A., Kazansky A.Yu., Bogolepova O.K., Gubanov A.P. Paleozoic history of the Kara microcontinent and its relation to Siberia and Baltica: paleomagnetism, paleogeography and tectonics // *Tectonophysics*, 2005, v. 398, p. 225-243

Molist, M., Anfruns, J., Bofill, M., Borrell, F., Buxó, R., Clop, X., Cruells, W., Faura, J.M., Ferrer, A., Gómez, A., Guerrero, E., Saña, M., Tornero, C., Vicente, O., 2013. Tell Halula (Euphrates Valley, Syria): New approach to VII and VI millennia cal. B.C. in Northern Levant framework. In: *Interpreting the Late Neolithic of Upper Mesopotamia. Publications on Archaeology of the Leiden Museum of Archaeology (PALMA)*, Brepols pub. (Turnhout, Belgium), pp. 443–455

Murray, A., Svendsen, J., Mangerud, J., Astakhov. V.I. 2007. Testing the accuracy of quartz OSL dating using a known-age Eemian site on the river Sula, northern Russia. *Quaternary Chronology* 1-2 (2007) 102 – 109

Nachasova Y.E., Magnetic field in the Moscow area from 1480 to 1840, *Geomagn, Aer-on.*, Engl. Transl., 1972, no. 12, pp. 277-280

Nieuwenhuysse, O., Akkermans, P., van der Plicht, J., 2010. Not so coarse, nor always plain-the earliest pottery of Syria. *Antiquity* 84, 71–85

Nieuwenhuyse, O.P., Bernbeck, R., Akkermans, P.M.M.G., Rogasch, J., 2013. Interpreting the late neolithic of upper Mesopotamia. Publications on Archaeology of the Leiden Museum of Archaeology (PALMA), Brepols pub. (Turnhout, Belgium), pp. 520

Nilsson A., Holme R., Korte M., Suttie N., Hill M. Reconstructing Holocene geomagnetic field variation: new methods, models and implications. 2014. *Geophysical Journal International*, 198, 1, p. 229-248

Nourgaliev, D.K., Borisov A.S., Heller F., Burov B.V., Jasonov, P.G., Khasanov D.I., Ibragimov Sh.Z. (1996), Geomagnetic secular variation through the last 3500 years as recorded by lake Aslikul sediments from eastern Europe (Russia). *Geophysical research letters*. 23, №. 4, 375-378

Ojala, A. and Saarinen, T. (2002). Palaeosecular variation of the Earth's magnetic field during the last 10000 years based on the annually laminated sediment of Lake Nautajärvi, central Finland. *The Holocene* 12

Panovska S., Korte M., Finlay C., Constable C, 2015. Limitations in paleomagnetic data and modelling techniques and their impact on Holocene geomagnetic field models. *GJI*, 202, N1, 402-418

Pavlov V., Bachtadse V., and Mikhailov V., 2008. New Middle Cambrian and Middle Ordovician palaeomagnetic data from Siberia: Llandelian magnetostratigraphy and relative rotation between the Aldan and Anabar–Angara blocks // *Earth and Planetary Science Letters*., v.276, iss. 3-4, pp. 229-242

Pavlov V., Gallet Y. A third superchron during the Early Palaeozoic, Episodes. 2005. V. 28. P. 78–84

Pavlov V., Gallet Y. Middle Cambrian high magnetic reversal frequency (Kulumbe River section, northwestern Siberia) and reversal behaviour during the Early Palaeozoic // *Earth planet. Sci. Lett.* 2001. V. 185. P. 173–183

Pavlov V., Gallet Y. Variations in geomagnetic reversal frequency during the Earth's middle age // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2010. V. 11. Q01Z10

Pavlov, V. and Gallet, Y. (1998). Upper Cambrian to Middle Ordovician magnetostratigraphy from the Kulumbe River section (northwestern Siberia). *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 108: 49-59. doi: 10.1016/S0031-9201(98)00087-9

Pisarevsky S.A., Gladkochub D. P., Konstantinov K. M., Mazukabzov A.M., Stanevich A.M., Murphy J.B., Tait J.A., Donskaya T.V., Konstantinov I.K. Paleomagnetism of Cryogenian Kitoi mafic dykes in South Siberia: Implications for Neoproterozoic paleogeography // *Precambrian Res.* 2013.V. 231. P. 372–382

Ponomareva V., Portnyagin M., Pevzner M., Blaauw M., Kyle P., Derkachev A. Tephra from andesitic Shiveluch volcano, Kamchatka, NW Pacific: Chronology of explosive eruptions and geochemical fingerprinting of volcanic glass. 2015. International Journal of Earth Science. 1046 1459-1482. doi: 10.1007/s00531-015-1156-4

Powerman V., A. Shatsillo, N. Chumakov, I. Kapitonov, J. Hourigan, 2015. Interaction between the Central Asian Orogenic Belt (CAOB) and the Siberian craton as recorded by detrital zircon suites from Transbaikalia. Precambrian Research, 2015, v. 267, pp. 39-71

Rainbird R.H., R.A. Stern, A.K. Khudoley, A.P. Kropachev, L.M. Heaman, V.I. Sukhurov, 1998. U–Pb geochronology of Riphean sandstone and gabbro from southeast Siberia and its bearing on the Laurentia–Siberia connection. EPSL, 1998, v. 164, iss. 3-4, pp. 409-420

Rojas-Agramonte Y., Kröner A., Demoux A., Xia X., Wang W., Donskaya T., Liu D., Sun M. Detrital and xenocrystic zircon ages from Neoproterozoic to Palaeozoic arc terranes of Mongolia: Significance for the origin of crustal fragments in the Central Asian Orogenic Belt // Gondwana Research 19 (2011) p.751-763

Sanchez S., A. Fournier, J. Aubert, E. Cosme, Y. Gallet, 2016, Modeling the archeomagnetic field under spatial constraints from dynamo simulations: a resolution analysis, GJI, 207, N2, 983-1002

Selkin, P.A. and Tauxe, L. (2000). Long-term variations in palaeointensity. Philosophical Transactions of the Royal Society of London 358(1768): 1,065-1,088. doi: 10.1098/rsta.2000.0574

Sengör A.M.C., Natalin B.A., Burtman V.S. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia // Nature. 1993. Vol. 364. p. 299-307

Shaar, R., Ben-Yosef, E., Ron, H., Tauxe, L., Agnon, A., Kessel, R. Geomagnetic field intensity: how high can it get? How fast it can change? Constrains from iron-age copper-slag. Earth. Plan. Sci. Lett. 301 (2011), 297 – 306

Shatsillo A.V., Pavlov V.E., Didenko A.N. Paleomagnetism of Vendian rocks in the Southwest of the Siberian platform // Russian Journal of Earth Sciences. 2006. T.8. № 2. C.1-30

Smethurst, M.A. & Khramov, A.N., 1992. A new Devonian palaeomagnetic pole for the Russian platform and Baltica, and related apparent polar wander. Geophys. J. Int., 108(1), 179-192, doi:10.1111/j.1365-246X.1992.tb00848.x

Sovetov J.K., Kulikova A.E., Medvedev M.N. Sedimentary basins in the southwestern Siberian craton: Late Neoproterozoic-Early Cambrian rifting and collisional events // The evolution of the Rheic ocean: from Avalonian-Cadomian active margin to Alleghenian-Variscan collision. Geol. Soc. of America. Special Paper. 2007. V. 423. P. 549-578

Tarduno, J.A., R.D. Cottrell, and A.V. Smirnov (2006), The paleomagnetism of single silicate crystals: Recording geomagnetic field strength during mixed polarity intervals, superchrons, and inner core growth, *Rev. Geophys.*, 44, RG1002, doi:10.1029/2005RG000189

Tauxe L., Kent D.V. A simplified statistical model for the geomagnetic field and the detection of shallow bias in paleomagnetic inclinations: Was the ancient magnetic field dipolar? // *Timescales of the paleomagnetic field*, ed. by Channell J.E.T. et al. American Geophysical Union. 2004. Vol. 145. P. 101–116

Tauxe, L., Inclination flattening and the geocentric axial dipole hypothesis, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2005, 233, 247–261

Thellier E., Thellier O. Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique, *Annales Géophysique*, Band 15, 1959, S. 285–376

Thouveny, N., Creer, K., Blunk, I., (1990), Extension of the Luc du Bouchet paleomagnetic record over the last 120000 years: *Earth and Planetary Science Letters*, v/97, p. 140–161

Torsvik, T.H., 1985. Magnetic properties of the Lower Old Red Sandstone lavas in the Midland Valley, Scotland; palaeomagnetic and tectonic considerations. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 39(3), 194–207, doi:10.1016/0031-9201(85)90090-1

Torsvik, T.H., R. Van der Voo, U. Preeden, C. Mac Niocaill, B. Steinberger, P.V. Doubrovine, D.J.J. van Hinsbergen, M. Domeier, C. Gaina, E. Tohver, J.G. Meert, P.J.A. McCausland, L.R.M. Cocks, Phanerozoic polar wander, palaeogeography and dynamics, *Earth-Science Reviews*, 2012, 114, 325–368

Turner, G.M., Thompson, R. (1981), Lake sediment record of the geomagnetic secular variation in Britain during Holocene times. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* 65, 703–25

Usoskin I.G., Hulot G., Gallet Y., Roth R., Licht A., Joos F., Kovaltsov G.A., Thüebault E., Khokhlov A. Evidence for distinct modes of solar activity, *Astronomy, Astrophysics*. 2014. V. 562. L10

V.E. Pavlov, V. Courtillot, M.L. Bazhenov, R.V. Veselovsky Paleomagnetism of the Siberian traps: New data and a new overall 250 Ma pole for Siberia *Tectonophysics*, 2007, Vol. 443, pp. 72–92

Vandamme D. A new method to determine paleosecular variation // *Phys. Earth Planet.* 1994. Int. 85. P. 131–142

Veselovskiy R. V. and V. E. Pavlov New paleomagnetic data for the Permian-Triassic Trap rocks of Siberia and the problem of a non-dipole geomagnetic field at the Paleozoic-Mesozoic boundary // *Russian Journal of Earth Sciences*, Vol 8, No. 1, February 2006) doi: 10.2205/2005ES000185

Veselovskiy, R.V. & Arzamastsev, A.A., 2011. Evidence for the Mesozoic endogenous activity in the northeastern part of the Fennoscandian Shield. *Dokl. Earth Sci.*, 438(2), 754-758, doi:10.1134/s1028334x11060377

Veselovskiy, R.V., Arzamastsev, A.A., Demina, L.I., Travin, A.V. & Botsyun, S.B., 2013. Paleomagnetism, geochronology, and magnetic mineralogy of Devonian dikes from the Kola alkaline province (NE Fennoscandian Shield). *Izv. Phys. Solid Earth*, 49(4), 526-547, doi:10.1134/s106935131303018x

Weil A. B., J.W. Geissman and J.M. Ashby. A new paleomagnetic pole for the Neoproterozoic Uinta Mountain supergroup, Central Rocky Mountain States, USA. *Precambrian Research* Volume 147, Issues 3-4 , 5 July 2006, Pages 234-259

Weil, A.B, Geissman, and Van der Voo, R. Paleomagnetism of the Neoproterozoic Chuar Group, Grand Canyon Supergroup, Arizona: Implications for Rodinia break-up and Laurentia's Neoproterozoic APWP, *Precambrian Research*, 129, 71-92, 2004

Weil, A.B, Geissman, J., Heizler, M. and Van der Voo, R. A paleomagnetic investigation of Middle Proterozoic mafic intrusions and Upper Proterozoic redbeds from the Lower Grand Canyon Supergroup, Arizona, *Tectonophysics*, 375,199-220,2003

Wetzel R.G., (2001), *Limnology. Lake and River Ecosystems* p.1006

Wicht, J., Hori, K., Dietrich, W., and Manglik, A., Numerical models of the early geodynamo, Abstracts, American Geophysical Union Fall Meeting 2011, 2011, UI13A_0023

Wilson, M. A., Clelland, S., Carter, M. A., Ince, C., Hall, C. M., Hamilton, A., et al. (2013). Rehydroxylation Of Fired-Clay Ceramics: Factors Affecting Early-Stage Mass Gain In Dating Experiments. *Archaeometry*

Wilson, M. A., Hall, C., Carter, M. A., Hoff, W. D., Ince, C., Savage, S. D., et al. (2009). Dating fired-clay ceramics using long-term power law rehydroxylation kinetics. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* , 465 (2108), 2407-2415

Wilson, M. A., Hamilton, A., Ince, C., Carter, M. A., & Hall, C. M. (2012). Rehydroxylation (RHX) dating of archaeological pottery. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* , 468 (2147), 3476-3493

Брайцева О.А., Егорова И.А., Несмачный И.А., Селянгин О.Б., Сулержицкий Л.Д. Тефрохронологическое датирование лавовых комплексов и реконструкция истории формирования современного вулкана. *Бюллетень вулканологических станций*. 1978. № 55. С. 41-54

Буслов М.М. Тектоника и геодинамика Центрально-Азиатского Складчатого пояса: роль позднепалеозойских крупноамплитудных сдвигов // *Геология и геофизика*. 2011. Т. 52. №1. С. 66-90

Верниковская А.Е., Верниковский В.А., Сальникова Е.Б., Котов А.Б., Ковач В.П., Травин А.В., Вингейт М.Т.Д. Лейкогранитный магматизм А-типа в эволюции континентальной коры западного обрамления Сибирского кратона // Геология и геофизика. 2007. Т.48, №1. С.5-21

Верниковская А.Е., Верниковский В.А., Матушкин Н.Ю., Полянский О.П., Травин А.В. Термохронологические модели эволюции лейкогранитов А-типа неопротерозойского коллизионного орогена Енисейского края // Геология и геофизика. 2009. Т.50, №5. С.576-594

Верниковская А.Е., Верниковский В.А., Сальникова Е.Б., Даценко В.М., Котов А.Б., Ковач В. П. Неопротерозойское анорогенное магматическое событие на Енисейском крае: новые геохимические и изотопно-геохронологические данные // ДАН, 2005. Т.403. №5. С.656-660

Верниковская А.Е., Верниковский В.А., Сальникова Е.Б., Даценко В.М., Котов А.Б., Ковач В. П., Травин А.В., Яковлева С.З. Гранитоиды Ерудинского и Чиримбинского массивов Заангарья Енисейского края – индикаторы неопротерозойских коллизионных событий // Геология и геофизика. 2002. Т.43(3). С.259-272

Верниковский В.А. и Верниковская А.Е., 2006. Тектоника и эволюция гранитоидного магматизма Енисейского края // Геология и геофизика, т. 47, №1, сс.35-52

Верниковский В.А., Верниковская А.Е. Тектоника и эволюция гранитоидного магматизма Енисейского края // Геология и геофизика. 2006. Т.47 (1). С.35-52

Верниковский В.А., Верниковская А.Е., Сальникова Е.Б., Бережная Н.Г., Ларионов А.Н., Котов А.Б., Ковач В.П., Верниковская И.В., Матушкин Н.Ю., Ясенов А.М. Поздне-рифейский щелочной магматизм западного обрамления Сибирского кратона – результат континентального рифтогенеза или аккреционных событий? // ДАН. 2008. Т.419. № 1. С.90-94

Верниковский В.А., Метелкин Д.В., Верниковская А.Е. и др. Неопротерозойская тектоническая структура Енисейского края и формирование западной окраины сибирского кратона на основе новых геологических, палеомагнитных и геохронологических данных // Геология и геофизика. 2016, Т.57. №1. С.63-90

Гладкочуб Д.П., А.М. Станевич, А.М. Мазукабзов, Т.В. Донская, С.А. Писаревский, Г. Николь, З.Л. Мотова, Т.А. Корнилова, 2013. Ранние этапы развития Палеоазиатского океана: данные по LA-ICP-MS датированию детритовых цирконов из позднедокембрийских толщ южного фланга Сибирского кратона. Геология и геофизика, 2013, т. 54, № 10, с. 1472-1490

Гражданкин Д.В., Конторович А.Э., Конторович В.А., Сараев С.В., Филиппов Ю.Ф., Ефимов А.С., Карлова Г.А., Кочнев Б.Б., Наговицин К.Е., Терлеев А.А., Федянин Г.О. Венд Предъенисейского осадочного бассейна (юго-восток Западной Сибири) // Геология и геофизика. 2015. Т.6, №4. С.718-734

Граница перми и триаса в континентальных сериях Восточной Европы. Материалы к Международному симпозиуму "Верхнепермские стратотипы Поволжья". М.: ГЕОС. 1998. 244 с

Диденко А.Н., Моссаковский А.А., Печерский Д.М., Руженцев С.В., Самыгин С.Г., Хераскова Т.Н. Геодинамика палеозойских океанов Центральной Азии // Геология и геофизика. 1994. Т. 35. № 7-8. С. 59

Конторович А.Э., Конторович В.А., Коровников И.В., Сараев С.В., Сенников Н.В., Филиппов Ю.Ф., Варламов А.И., Ефимов А.С., Филиппов Ю.А., Постников А.А., Терлеев А.А., Карлова Г.А., Наговицин К.Е., Токарев Д.А., Батурина Т.П., Губин И.А., Кочнев Б.Б., Новожилова Н.В., Лучинина В.А. Разрез кембрия в восточной части Западно-Сибирской геосинеклизы (по результатам бурения параметрической скважины Восток-4) // Геология и геофизика. 2012, Т.53. №10, С.1273-1284

Кочегура В.В., Зубов А.Г., Брайцева О.А. Магнитостратиграфия голоценовых почвенно-пирокластических образований Камчатки. Вулканология и сейсмология. 1986, № 6, с. 3-17

Крайнов М.А., Песков А.Ю., Косынкин А.В., Кузьмин М.И. Запись поведения геомагнитного поля в осадках озера Байкал (скв. BDP-99). Геология и геофизика, 2013, т. 54, № 11, с. 1795-1802

Кузнецов А.Б., Горохов И.М., Семихатов М.А. и др. Изотопный состав стронция в известняках инзерской свиты стратотипа верхнего рифея, Южный Урал // Докл. АН. 1997. Т. 353. № 2. С. 249-254

Кузнецов Н.Б., Прияткина Н.С., Рудько С.В., Шацилло А.В., Коллинз В.Д., Романюк Т.В. Первые данные о U/Pb-изотопных возрастах и Lu/Hf-изотопно-геохимической систематике детритных цирконов из лопатинской свиты (пограничные уровни венда-кембрия) и тектоническая природа Тейско-Чапского прогиба (СВ Енисейского кряжа) // ДАН. 2017 (в печати)

Кузнецов Н.Б., Шацилло А.В. Возраст и обстановки седиментации базальных уровней "неопротерозойского" разреза Тейско-Чапского прогиба (северо-восточная часть Енисейского кряжа) // Осадочные бассейны, седиментационные и постседиментационные процессы в геологической истории. Новосибирск: ИНГГиГ. 2013. С.125-129

Кузнецов Н.Б., Шацилло А.В., Рудько С.В. Характер границ (сдвиги или надвиги?) между Восточно- и Центрально-Ангарскими блоками докембрия в современной структуре Заангарской части Енисейского кряжа: анализ литературы и вести с полей // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы совещания. Вып. 14. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН. 2016. С.156-158

Летникова Е.Ф., И.А. Вишневская, Н.И. Ветрова, А.И. Прошенкин, Н.А. Прияткина, Е.А. Бродникова Вендские отложения западной окраины Сибирской платформы (ворговская серия, Енисейский Кряж) // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы совещания. Вып. 14. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН. 2016. С. 184-186

Лиханов И.И., Ножкин А.Д., Ревердатто В.В., Козлов П.С. Гренвильские тектонические события и эволюция Енисейского кряжа, западная окраина Сибирского кратона // Геотектоника. 2014. № 5. С.32-53

Лиханов И.И., Попов Н.В., Ножкин А.Д. Древнейшие гранитоиды Заангарья Енисейского кряжа: U–Pb и Sm–Nd данные, обстановки формирования // Геохимия. 2012. №10. С.966-976

Лиханов И.И., Ревердатто В.В., Вершинин А.Е. Геохимия, природа, возраст протолита нижнепротерозойских железисто-глинистых метапелитов Заангарья Енисейского кряжа // ДАН. 2010. Т.433, №3. С.378–385

Метелкин Д.В., Верниковский В.А., Казанский А.Ю., Белоносов И.В., 2005. Сибирский кратон в структуре суперконтинента Родиния: анализ палеомагнитных данных // Докл. РАН. Т.404. № 3. С.389-394

Метелкин Д.В. Эволюция структур центральной Азии и роль сдвиговой тектоники по палеомагнитным данным // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук / Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук. Новосибирск, 2010

Метелкин Д.В., Благовидов В.В., Казанский А.Ю. История формирования карагаской серии Бирюсинского Присяяня: синтез палеомагнитных и литолого-фациальных данных. Геология и геофизика, т.51, №8, 2010, с.1114-1133

Метелкин Д.В., В.А. Верниковский, А.Ю.Казанский. Неопротерозойский этап эволюции Родинии в свете новых палеомагнитных данных по западной окраине Сибирского кратона. Геология и Геофизика. 2007. Т.48. №1. С.42-59

Мунчаев Р.М., Мерперт Н.Я. Раннеземельческие поселения Северной Месопотамии в Ираке. Москва, «Наука», 1981. – 320 с

Никулова Н.Ю., Удоратина О.В., Хубанов В.Б. Возраст песчаников в основании разреза уралид на хр. Сабля (Приполярный Урал) по результатам U-Pb датирования детритных цирконов // Бюллетень МОИП. Отд. Геологический. 2016. Т.91, №1, С.15-23

Ножкин А.Д., Качевский Л.К., Дмитриева Н.В. Поздненеопротерозойская метариолит-базальтовая ассоциация Глушихинского прогиба (Енисейский кряж): новые данные по петрогеохимическому составу, возрасту и условиям образования // ДАН. 2012. Т.445. №3. С.332-337

Ножкин А.Д., Постников А.А., Наговицин К.Е., Травин А.В., Станевич А.М., Юдин Д.С. Чингасанская серия неопротерозоя Енисейского кряжа: новые данные о возрасте и условиях формирования // Геология и геофизика. 2007. С.1307-1320

Прияткина Н.С., Кузнецов Н.Б., Шацилло А.В., Рудько С.В., Худолей А.К., Коллинз В.Дж. U/Pb датирование цирконов из позднедокембрийских и раннепалеозойских песчаников Енисейского кряжа // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы совещания. Вып. 14. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН. 2016. С.230-232

Романова И.В., Верниковская А.Е., Верниковский В.А., Матушкин Н.Ю., Ларионов А.Н. Неопротерозойский щелочной и ассоциирующий с ним магматизм в западном обрамлении Сибирского кратона: петрография, геохимия и геохронология // Геология и геофизика, 2012. Т.53, № 11. С.1530-1555

Рудько С.В., Кузнецов Н.Б., Шацилло А.В., Павлов В.Э. Седиментологическая характеристика лопатинской свиты в контексте аномальной магнитостратиграфической записи Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). Иркутск: ИЗК СО РАН, 2015. С.200-201

Рыцк Е. Ю., В. П. Ковач, В. В. Ярмолюк, В. И. Коваленко, Е. С. Богомоллов, А. Б. Котов, 2011. Изотопная структура и эволюция континентальной коры Восточно-Забайкальского сегмента Центрально-Азиатского складчатого пояса. Геотектоника, 2011, №5, с. 17-51

Рыцк Е.Ю., А.Ф. Макеев, В.А. Глебовицкий, А.М. Федосеенко, 2004. Вендский (590±5 млн лет) возраст падринской серии Байкало-Муйского складчатого пояса: U-Pb данные по циркону. ДАН, 2004, т. 397, № 4, с. 517-519

Рыцк Е.Ю., А.Ф. Макеев, В.П. Ковач, Е.С. Богомоллов, А.М. Федосеенко, 2009. Возраст гранитоидов зоны сочленения Байкало-Муйского складчатого пояса и Каларского метаморфического террейна. Стратиграфия. Географическая корреляция, 2009, т.17, №2, с. 38-46

Семихатов М.А., Серебряков С.Н. Сибирский гипостратотип рифея. М.: Наука, 1983. 224 с

Соболева А.А., Кузнецов Н.Б., Миллер Э.Л., Удоратина О.В., Герелс Дж., Романюк Т.В. Первые результаты U/Pb-датирования детритных цирконов из базальных горизонтов уралид (Полярный Урал) // ДАН. 2012. Т.415. №5. С.570-576

Советов Ю.К., Благовидов В.В. Реконструкция бассейна осадконакопления (на примере вендского предгорного прогиба – «форландового бассейна» юго-запада Сибирской платформы. В кн. Осадочные бассейны: методика изучения, строение и эволюция. М. Научный мир. 2004. 526 с

Филипцов Ю.А. Нефтегазоносность верхнего протерозоя западной части Сибирской платформы // Диссертации на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук. Новосибирск. ИГГИГ СО РАН. 2015. 449

Хераскова Т.Н., Каплан С.А., Галуев В.И. Строение Сибирской платформы и ее западной окраины в рифее – раннем палеозое // Геотектоника. 2009. №2. С.37-56

Хоментовский В.В. Верхний рифей Енисейского кряжа // Геология и геофизика. 2007. Т.48. №9. С.921-933

Чумаков Н.М., Б.Г. Покровский, В.А. Мележик, 2007. Геологическая история Патомского комплекса, поздний докембрий, Средняя Сибирь. ДАН, 2007, т.413, № 3, с. 1-5

Шацилло А.В. Взаимодействие Сибири и Балтики на финальном этапе амальгамации евразийской части Пангеи // Физика Земли, 2015а, № 2. С.150–164

Шацилло А.В. Единство Сибири, Арктиды и Балтики в палеозое: гипотеза «прото-евразийской» плиты // Тектоника и геодинамика континентальной и океанической литосферы: общие и региональные аспекты. Материалы XLVII Тектонического совещания. Том 2. М.: ГЕОС, 2015б С. 277-282

Шацилло А.В., И.В. Федюкин, В.И. Паверман, 2014. Палеомагнетизм позднепалеозойских гранитов Ангара-Витимского батолита и вмещающих пород Байкало-Патомской складчатой области: тектонические следствия. Геология и геофизика, 2014, т. 55, № 7, с. 1093—1111

Шацилло А.В., Кузнецов Н.Б., Павлов В.Э., Федонкин М.А., Прияткина Н.С., Серов С.Г., Рудько С.В. Первые магнитостратиграфические данные о стратотипе верхнепротерозойской лопатинской свиты (северо-восток Енисейского кряжа): проблемы ее возраста и палеогеографии Сибирской платформы на рубеже протерозоя и фанерозоя // ДАН. 2015. Т.465, №4. С.464-468

Шацилло А.В., Шипунов С.В., Орлов С.Ю., Жарков И.Я., Баженов М.Л. Новые палеомагнитные данные по татарскому ярусу Русской платформы // в сб. Палеомагнетизм и

магнетизм горных пород; теория, практика, эксперимент. Материалы семинара, Борок, 19-22 октября, 2006. М.: ГЕОС, 2006. с.28-32

Шенгер А.М., Натальин Б.А., Буртман В.С. Тектоническая эволюция Алтаид // Геология и геофизика. 1994. Т. 35. № 7-8. С. 41-5

Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Сальникова Е.Б., Никифоров А.В., Котов А.Б., Владыкин Н.В. Позднерифейский рифтогенез и распад лавразии: данные геохронологических исследований щелочно-ультраосновных комплексов южного обрамления Сибирской платформы // ДАН. 2005. Т. 404. №3. С.400-406