

ОТЧЕТ

Ведущего ученого о научных исследованиях, проведенных в 2017 году

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 магнитного поля (№ 106).

Ведущий ученый

_____ /Ив Галле/

Москва 2017

СОДЕРЖАНИЕ

	Аннотация	4
	Введение	15
1.1	Выполнение исследований, направленных на повышение чувствительности автоматических археомагнитных измерений, выполняемых на базе трехкомпонентного термомагнитометра, производства геофизической обсерватории (ГО) «Борок» ИФЗ РАН	19
1.2	Разработка и отладка передовых протоколов для археомагнитных экспериментов с использованием аппаратуры «Triax» и трехкомпонентного термомагнитометра, производства ГО «Борок»	26
1.3	Установление критериев и методов для диагностики вторичной намагниченности в магматических горных породах	34
1.4	Археомагнитное древнейших памятников человеческой цивилизации Ярим-Тепе 1 и Ярим-Тепе 2 с целью детализация записи изменений напряженности геомагнитного поля в 6 и 7 тысячелетиях до нашей эры	43
1.5	Построение сводной региональной кривой вариаций направлений и напряженности геомагнитного поля на территории Средней Азии и Среднего Востока на протяжении последних ~5000 лет	54
1.6	Изучение напряженности геомагнитного поля на территории Центральной России в интервале XVI век - начало XIX века	66

1.7	Реконструкция вариаций геомагнитного поля последних тысячелетий по записям в донных отложениях современных озёр европейской части России: калибровка амплитуд с использованием археомагнитных данных	76
1.8	Изучение связи временных и пространственных характеристик вековых вариаций геомагнитного поля	87
1.9	Тестирование существования в геологической истории длительных аномальных режимов работы геодинамо	91
1.10	Получение палеомагнитных ограничений на палеогеографическое и палеотектоническое положение Сибирской платформы (СП) в позднем неопротерозое	104
1.11	Ревизия положения западной границы СП на основе комплексного анализа палеомагнитных, геохронологических, седиментологических, хемо- и биостратиграфических данных	112
1.12	Палеомагнитное тестирование гипотезы Родинии для интервала времени 1050-1100 млн. лет	133
1.13	Приобретение оборудования для научных исследований. Приобретение материалов и комплектующих для оборудования.	148
1.14	Текущий ремонт лаборатории, а также прочие расходы, непосредственно связанные с проведением научного исследования.	151
1.15	Участие ведущего ученого и членов научного коллектива в конференциях, научных семинарах, симпозиумах.	152
1.16	Организация конференции, проводимой научным коллективом лаборатории по направлению научного исследования	154

1.17	Подготовка и публикация статей по теме проекта	155
1.18	Подготовка, переподготовка и повышение квалификации членов научного коллектива	156
1.19	Характеристика эпох слабого магнитного поля в истории Земли: изучение напряженности геомагнитного поля	158
1.20	Исследование подавления магнитным полем альфа-эффекта в геодинамо-моделях среднего поля	168
1.21	Приобретение оборудования для научных исследований. Приобретение материалов и комплектующих для оборудования.	173
1.22	Текущий ремонт лаборатории, а также прочие расходы, непосредственно связанные с проведением научного исследования.	174
	Заключение	175
	Литература	184

АННОТАЦИЯ

Все задачи Проекта на 2017 г. успешно решены. При этом получены следующие основные результаты:

1.1. Выполнены исследования, направленные на определение возможности повышения чувствительности трёхкомпонентного термомагнитометра, изготовленного в ГО «Борок» ИФЗ РАН, путём модернизации модуля датчиков магнитного момента в рамках существующей конструкции. Проведены сравнительные испытания различных прецизионных сплавов, которые могли бы быть использованы при изготовлении датчиков магнитного момента. Показано, что наибольшим коэффициентом передачи (и, следовательно, наибольшей чувствительностью) обладают феррозондовые датчики магнитного момента с сердечниками изготовленные из сплавов пермаллой 83НФ, 79НМ и супермаллой. К сожалению, в настоящее время на отечественных предприятиях отсутствуют отработанные технологии, позволяющие производить сердечники с необходимыми магнитными характеристиками и равномерным распределением магнитных свойств по всему объему. Поэтому повышение чувствительности существующих датчиков на базе отечественных материалов в настоящее время не представляется возможным, закупка же импортных материалов связана с существенными затруднениями.

1.2. Разработан протокол автоматической коррекции влияния анизотропии термоостаточной намагниченности на результаты определения величины напряженности древнего магнитного поля и выполнена его программно-аппаратурная реализация на трёхкомпонентном термомагнитометре, производства ГО «Борок» ИФЗ РАН. В результате проведенной модернизации существенно расширены функциональные возможности трёхкомпонентного термомагнитометра системы ГО «Борок», создан не имеющий аналогов в России прибор, который позволяет существенно увеличить производительность и

эффективность научных исследований в области магнетизма, палео- и архео-магнетизма.

1.3. Выполнены экспериментальные исследования и проведён теоретический анализ свойств химической остаточной намагниченности CRM. Показано, что «палеонапряжённость», определённая на образцах, содержащих этот вид намагниченности методом Телье-Коэ по линейным участкам диаграмм Араи-Нагата, оказывается в 2-3 раза заниженной по сравнению с истинным полем создания CRM. В палеомагнитном аспекте это означает, что ряд определений палеонапряжённости, присутствующих в Мировой Базе Данных по палеонапряжённости могут нести ложную информацию о поведении интенсивности геомагнитного поля в прошлом. Выполнено численное моделирование методом Монте-Карло процесса образования CRM в системе однодоменных (ОД) взаимодействующих частиц, показано, что спектры деблокирующих температур CRM и TRM имеют очень большое сходство, тем самым свидетельствуя в пользу предположения о слабой различимости CRM и TRM при определении палеонапряжённости по методике Телье.

1.4. Для изучения короткопериодичных вариаций напряженности геомагнитного поля на территории Ближнего востока в седьмом и шестом тысячелетиях до н.э. нами было выполнено археомагнитное исследование древних археологических памятников Ярым Тепе I и II, относящихся к Хассунской и Халафской культурам Позднего Неолита и расположенных на современной территории Северного Ирака.

Наши данные, полученные по Ярым Тепе II, выявили явный тренд к снижению значений археонапряженности на протяжении шестого тысячелетия до н.э., с наличием четкой ступенчатой эволюцией поля в интервале ~5600 – 5400 лет до н.э. Резкое падение напряженности геомагнитного поля сопровожда-

лось узким пиком (продолжительностью предположительно менее одного столетия) около 5500 лет до н.э. Археоманнитные определения по Ярым Тепе I показали отсутствие значительных вариаций напряженности геомагнитного поля на протяжении 7-го тысячелетия до н.э. Значения напряженности геомагнитного поля в этом интервале хорошо согласуются с таковыми, полученными ранее по археологическим памятникам Сирии (Gallet et al., 2015).

1.5. Полученные в 2017 г. палеомагнитные данные, подтверждают, что такырные отложения являются перспективным объектом для изучения вариаций геомагнитного поля на протяжении последних тысячелетий. Массовая палеомагнитная обработка отобранных коллекций, с изучением по несколько дублей с каждого стратиграфического уровня и с использованием как температурной чистки, так и чистки переменным магнитным полем, позволит получить к концу 2018 г. детальную запись вариаций геомагнитного поля в Средней Азии на протяжении последних нескольких тысячелетий. Для этого в 2017 г. сделан важный задел, как в плане палео- и петромагнитного изучения коллекций, так и в плане их датирования.

Датирование такырных отложений, основанное на суперпозиции годовых варв, подтверждается предварительными данными, полученными при OSL датировании. Голоценовые отложения на территории Средней Азии представляют собой потенциально перспективный объект для усовершенствования протокола OSL, разработанного и успешно применяемого для датирования более древних отложений.

В 2017 г. начаты работы по палинологическому, гранулометрическому и другим видам дополнительных анализов, результаты которых будут получены в 2018 г. Сопоставление их с полученными петромагнитными данными представляется весьма многообещающим для реконструкции палеоклиматических обстановок и палеогеографии региона.

1.6. По хорошо датированным археологическим памятникам Ярославской области получены новые данные о напряженности геомагнитного поля на территории Центральной России в интервале времени начало XVIII века – первая треть XIX века. Эти данные хорошо согласуются с вариациями геомагнитного поля, наблюдаемыми на территории Западной Европы в течение того же временного периода. Последнее дает основание считать, что в рассматриваемое время вклад недипольных источников в геомагнитное поле на территории Европы был незначителен. Полученные данные позволяют выполнить тестирование существующих глобальных моделей геомагнитного поля для последних столетий и поддерживают те из них, которые предполагают несущественные изменения геомагнитного поля в период с XVIII по XIX вв.

1.7. В 2017 г. были организованы экспедиции к ряду озер Центральной России для проведения сейсмоакустических исследований. Это позволило наметить озера, перспективные для отбора керновых колонок для палеомагнитных исследований. Такие озера главным образом расположены на территории Челябинской области и Республики Башкортостан. В этом году также проведена экспедиция к озеру Тургояк (Челябинская область). Сейсмоакустические исследования позволили выбрать оптимальные точки для отбора колонок донных отложений. Всего отобрано 6 керновых колонок средней мощностью 5.5 м. Проведен детальный отбор образцов (более 1300) для лабораторных исследований. Проведены магнитно-минералогические, предварительные палеомагнитные и палеобиологические исследования осадков. По ряду проб осадков озер Плещеево (Ярославская область) и Большой Кисегач (Челябинская область) определен абсолютный возраст радиоуглеродным методом в лаборатории NTUAMS Факультета наук о Земле Национального университета Тайваня (Тайпей, Тайвань). Проведены магнитно-минералогические исследования осадков озера Кисегач. На основе полученных данных, построены мо-

дели временного масштаба и мастер-кривые. Полученные мастер-кривые сопоставлены с известными записями по озерам Восточной и Западной Европы, выявлены некоторые особенности, возможно, связанные с влиянием недипольных источников геомагнитного поля.

1.8. Выполнены расчеты, которые позволили уточнить связь пространственных и временных масштабов изменчивости магнитного поля, возникающего из геодинамо. Показано, что вплоть до $n=44$ имеется структура зависимости автокорреляций коэффициентов $g_n^m(t)$, $h_n^m(t)$ при сферических гармониках от параметров n, m . В первом приближении эта зависимость эффективной ширины $a(n, m)$ автокорреляционной функции по порядку величины обратно пропорциональна $(n+m)$. Вариация параметров геодинамо, полярность исследуемого поля не влияют на эту оценку. Также получены уточнения указанной зависимости, позволяющие утверждать существование поправочных членов в найденной аппроксимации.

1.9. Изучены представительные палеомагнитные коллекции пород раннекембрийского и позднеэдиакарского возраста Севера, Северо-Востока и Востока Сибирской платформы. Получены новые свидетельства аномального характера палеомагнитной записи в породах позднего эдиакария-нижнего кембрия Сибирской платформы. Эти данные уверенно подтверждают справедливость гипотезы [Павлов и др., 2004] о том, что в значительной части переходных венд-кембрийских слоев Сибирской платформы объективно существуют две значительно различающиеся по направлению стабильные высокотемпературные компоненты намагниченности, каждая из которых может рассматриваться в качестве первичной, образовавшейся не позднее раннего кембрия. Анализ мировых палеомагнитных данных для этого интервала геологической истории показывает, что наблюдаемые в Сибири особенности палеомагнитной

палеомагнитной записи для границы докембрия и фанерозоя носят планетарный характер, не согласуются с традиционными представлениями о палеомагнитной записи, как отражающей преимущественно аксиально-дипольный характер геомагнитного поля и требуют допущения, что геомагнитное поле на границе протерозоя и фанерозоя (эдиакария- нижнего кембрия) существенно отличалось от геомагнитного поля более поздних эпох. Для объяснения наблюдаемой палеомагнитной записи мы предлагаем гипотезу, согласно которой геомагнитное поле на границе докембрия и кембрия имело аномальный характер. Это поле характеризовалось наличием двух квазистабильных режимов генерации, поочередно сменяющих друг друга. Согласно этой гипотезе, магнитное поле Земли на границе докембрия и кембрия может быть описано чередованием продолжительных периодов господства аксиального преимущественно монополярного дипольного поля, перемежающегося с относительно кратковременными (длительностью порядка сотен тысяч лет) эпохами преобладания инверсирующего близэкваториального или среднеширотного диполя. Предлагаемая гипотеза согласуется с данными, полученными при изучении переходных полей палеозойских инверсий [Храмов и Иосифиди, 2012], а также с данными численного моделирования геодинамо [Aubert and Wicht, 2004; Glatzmayer and Olson, 2005; Gissinger et al., 2012].

1.10. Изучены представительные палеомагнитные коллекции мезо-неопротерозойских пород севера и северо-востока Сибирской платформы. Получены новые палеомагнитные данные о положении Сибирской платформы в неопротерозое. Рассчитаны палеомагнитные полюсы, существенно дополняющие траекторию кажущейся миграции полюса (ТКМП) Сибирской платформы в неопротерозое. Новые палеомагнитные полюсы подтверждают существование индоокеанского тренда неопротерозойских полюсов Сибирь, предложенного в работах [Shatsillo et al., 2006; Pavlov et al., 2015]. По новым палеомагнитным данным для неопротерозойского сегмента ТКМП Сибири показано, что

во временной промежуток ~920-800 млн. лет Сибирская платформа испытала перемещение из экваториальных широт примерно на 15° в северном направлении и расположилась в приэкваториальных широтах. При этом был осуществлен поворот на $\sim 5^{\circ}$ по часовой стрелке.

1.11. В 2017 г. проведено палеомагнитное, геохронологическое и изотопно-геохимическое, структурно-геологическое и седиментологическое изучение позднедокембрийских и раннепалеозойских комплексов северной (Зангарской) части Енисейского кряжа. Кроме того, были проведены сбор, систематизация и анализ разнородной геолого-геофизической информации по строению фундамента прилегающей к Енисейскому кряжу с запада части эпигерцинской Западно-Сибирской плиты. На этой основе был сделан вывод, в соответствие с которым этот регион представляет собой перекрытую комплексами мезозойско-кайнозойского чехла глубокопогруженную западную часть Сибирской платформы. В связи с этим следует считать, что западная граница Сибирской платформы расположена существенно западнее по сравнению с положением этой границы на современных тектонических картах. Кроме того, создана численная модель бассейновой эволюции этой глубокопогруженной части Сибирской платформы в позднем докембрии и фанерозое. Совместное рассмотрение полученных данных и результатов синтеза всей совокупности геолого-геофизических данных – палеомагнитных, геохронологических, геохимических, седиментологических и палеонтологических по вендско-кембрийским, верхнедокембрийским и нижнепалеозойским разрезам запада Сибирской платформы позволило из трех ранее сформулированных вариантов эволюции ее западной периферической части в позднем докембрии и самом начале палеозоя считать более вероятной концепцию, в соответствии с которой позднерифейские и вендские комплексы и структуры, экспонированные в современной структуре Енисейского кряжа, были транслированы сюда по крупноамплитудной левосторонней трансензионной системе.

1.12. В 2017 г. завершена интерпретация палеомагнитных данных, полученных в ходе исследований малгинской и тоттинской среднерифейских свит, отобранных из обнажений долины р. Белой, в пределах Горностахской антиклинали, расположенной на севере Учуро-Майского района (восток Сибирской платформы). При этом получены следующие основные результаты: 1. Тектонический блок, к которому принадлежит Горностахская антиклиналь Сетте-Дабана не испытал вращений при надвигании на Сибирскую платформу, следовательно, палеомагнитные полюсы Горностахской антиклинали могут быть отнесены ко всей Сибирской платформе; 2. Полученные палеомагнитные данные указывают на существенную диахронность границы тоттинской и малгинской свит в пределах Учуро-Майского региона; 3. В тоттинское время Сибирская платформа находилась в средних широтах северного полушария и была развернута на 115 относительно меридианной сетки по сравнению с современным ее положением; 4. Кривые КМП для Лаврентии и Сибири могут быть согласованы для интервала времени 1100-950 млн. лет, что может рассматриваться как сильный аргумент в пользу того, что на протяжении всего этого времени Сибирь и Лаврентия входили в состав единого суперконтинента (Родиния). При этом полученные данные подтверждают ранние результаты (Павлов и др., 2002), согласно которым югоюго-восточная окраина Сибири была обращена к северным территориям Лаврентии; 5. Минимизация расхождений кривых КМП Сибири и Лаврентии приводит к наличию между этими древними кратонами некоторого пространства, которое в составе суперконтинента Родиния могло быть занято неким третьим континентальным блоком (что согласуется с гипотезой Pisarevsky and Natapov, 2003).

1.13. Приобретено новое оборудование, расширившее спектр технических задач, которые способна решать лаборатория. Закуплены материалы и комплектующие для оборудования и проведения научного исследования.

1.14. Обеспечено пребывание ведущего ученого в Москве. Закуплено компьютерное оборудование и новая лабораторная мебель.

1.15. Сделан 61 доклад по теме научного исследования на 10 конференциях, в т.ч. 5 международных.

1.16. Организовано 2 конференции по теме проекта.

1.17. Подготовлено 24 научные публикации по теме проекта, в т.ч. 20 – в журналах, входящих в базу данных Web of Science.

1.18. 10 сотрудников лаборатории прошли курсы по использованию петромагнитных данных в палеомагнитных и археомагнитных исследованиях. 6 сотрудников прошли курсы подготовки к тесту TOEFL.

1.19. Изучение вариаций геомагнитного поля в различных масштабах времени критично для понимания процессов, происходящих в ядре Земли, для изучения мантийной динамики и планетарной эволюции. Более того, вопрос о том насколько геомагнитное поле прошлого было похоже на преимущественно дипольное поле позднего кайнозоя критичен для определения надежности предложенных к настоящему времени палеогеографических и палеотектонических реконструкций, а также для оценки защитных (от космического излучения) свойств магнитосферы в геологическом прошлом. Ряд выполненных ранее исследований давали основание думать, что на протяжении большей части девона (419–359 Ma) геомагнитное поле имело сложную, существенно недипольную конфигурацию. В настоящей работе представлены результаты исследования вулканических потоков, силлов и даек Кольского полуострова и Минусинского региона Сибири с возрастом между 408 и 375 млн. лет, которые позволяют оценить напряженность геомагнитного поля в течение

соответствующего временного периода. На образцах, отобранных из этих объектов, нами были выполнены эксперименты по определению напряженности геомагнитного поля девона с использованием классического метода Телье, метода Вилсона, а также, новой микроволновой техники. Всего было изучено 165 образцов, отобранных из 25 обнажений. 12 из 14 сайтов, для которых удалось получить качественные определения, дают результаты, которые определенно указывают на крайне низкую ($<10 \mu\text{T}$) напряженность девонского геомагнитного поля. Эти данные, наряду с имеющейся информацией об очень высоком разбросе палеомагнитных направлений в девоне, свидетельствуют в пользу не-униформитариянского поведения геомагнитного поля в рассматриваемый интервал времени и поддерживают гипотезу о том, что геометрия магнитного поля Земли на протяжении многих миллионов лет могла значительно отличаться от дипольной. Долговременное ослабление магнитного поля и его отклонение от дипольной геометрии могло существенно усилить влияние солнечного (космического) излучения на магнитосферу, ионосферу и атмосферу с потенциально серьезными последствиями для эволюции климата и биосферы.

1.20. Рассмотрена двумерная модель динамо среднего поля с алгебраической формой нелинейности. Геострофические альфа-эффект и дифференциальное вращение взяты из трехмерных моделей конвекции в жидком ядре Земли. Анализ показывает, что они локализованы в разных пространственных областях, и их корреляция составляет не более 10%. Модель позволяет генерировать характерное Z-образное распределение полоидального магнитного поля, сконцентрированное внутри Тейлоровского цилиндра.

1.21. Приобретены комплектующие к новому высокотехнологичному микроскопу Olympus BX53, а также высокопроизводительное вычислительное оборудование.

1.22. ИФЗ РАН обеспечена поддержка лаборатории в техническом и организационном плане.

ВВЕДЕНИЕ

В течение 2014-2016 гг. в рамках выполнения Постановления Правительства РФ от 9 апреля 2010 г. № 220 и на основании Договора № 14.Z50.31.0017 от 24 марта 2014г. между Минобрнауки России, ИФЗ РАН и ведущим ученым И. Галле, под научным руководством последнего на базе ИФЗ РАН были проведены научно-исследовательские работы по Проекту “Эволюция геомагнитного поля и взаимодействие планетарных оболочек”.

Для реализации этого проекта в Институте 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 являлись: (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 были сформулированы конкретные задачи, объединенные в 4 блока, отвечающие глобальным задачам Проекта: Блок 1: Создание новой лабораторной инфраструктуры и разработка новых методов; Блок 2: Построение опорных кривых палеогеомагнитных 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.

Все задачи, стоявшие перед Проектом на 2014-2016гг. были успешно решены, при этом плановые показатели эффективности выполнения научного исследования были выполнены, а по ряду показателей и значительно превзойдены. Исходя из этих результатов между Минобрнауки России, ИФЗ РАН и

ведущим ученым И.Галле было заключено дополнительное соглашение №2 к договору № 14.Z50.31.0017 от 24 марта 2014 г., согласно которому стороны согласились продлить на 2 года проведение в ИФЗ РАН научного исследования по направлению «Эволюция геомагнитного поля и взаимодействие планетарных оболочек» под руководством Ведущего ученого И.Галле в соответствии с Планом работ, представленным в Приложении №2 к Дополнительному соглашению.

В соответствии с этим планом в 2017 г. планировалось выполнить исследования по следующим направлениям:

1.1. Выполнение исследований, направленных на повышение чувствительности автоматических археомагнитных измерений, выполняемых на базе трехкомпонентного магнитометра, производства обсерватории “Борок”.

1.2. Разработка и отладка передовых протоколов для археомагнитных экспериментов с использованием аппаратуры “Tgіахе” и трехкомпонентного магнитометра, производства ГО «Борок».

1.3. Установление критериев и методов для диагностики вторичной намагниченности в магматических горных породах.

1.4. Археомагнитное изучение древнейших памятников человеческой цивилизации Ярым-Тепе 1 и Ярым-Тепе 2 с целью детализация записи изменений напряженности геомагнитного поля в 6 и 7 тысячелетиях до нашей эры.

1.5. Построение сводной региональной кривой вариаций направлений и напряженности геомагнитного поля на территории Средней Азии и Среднего Востока на протяжении последних ~5000 лет.

1.6. Изучение напряженности геомагнитного поля на территории Центральной России в интервале XVI век - начало XIX века.

1.7. Реконструкция вариаций геомагнитного поля последних тысячелетий по записям в донных отложениях современных озёр европейской части России: калибровка амплитуд с использованием археомагнитных данных.

1.8. Изучение связи временных и пространственных характеристик вековых вариаций геомагнитного поля.

1.9. Тестирование гипотезы существования в геологической истории длительных аномальных режимов работы геодинамо.

1.10. Получение палеомагнитных ограничений на палеогеографическое и палеотектоническое положение Сибирской платформы (СП) в позднем неопротерозое.

1.11. Ревизия положения западной границы СП на основе комплексного анализа палеомагнитных, геохронологических, седиментологических, хемо- и биостратиграфических данных.

1.12. Палеомагнитное тестирование гипотезы Родинии для интервала времени 1050-1100 млн. лет.

1.13. Приобретение оборудования для научных исследований. Приобретение материалов и комплектующих для оборудования.

1.14. Текущий ремонт лаборатории, а также прочие расходы, непосредственно связанные с проведением научного исследования.

1.15. Участие ведущего ученого и членов научного коллектива в конференциях, научных семинарах, симпозиумах.

1.16. Организация конференции, проводимой научным коллективом по направлению научного исследования.

1.17. Подготовка и публикация статей по теме проекта.

1.18. Подготовка, переподготовка и повышение квалификации членов научного коллектива.

1.19. Характеристика эпох слабого магнитного поля в истории Земли: изучение напряженности геомагнитного поля в докембрии и на границе перми и триаса.

1.20. Исследование подавления магнитным полем альфа-эффекта в геодинамо-моделях среднего поля.

1.21. Приобретение оборудования для научных исследований. Приобретение материалов и комплектующих для оборудования.

1.22. Текущий ремонт лаборатории, а также прочие расходы, непосредственно связанные с проведением научного исследования.

Все плановые задания 2017 г. успешно выполнены. Ниже описываются основные результаты, полученные в ходе выполнения плана научно-исследовательских работ 2017 г.

Задача 1.1. Выполнение исследований, направленных на повышение чувствительности автоматических археомагнитных измерений, выполняемых на базе трехкомпонентного термомагнитометра, производства геофизической обсерватории (ГО) “Борок” ИФЗ РАН.

Актуальность проблемы

В ГО «Борок» ИФЗ РАН разработан и используется для исследований уникальный трёхкомпонентный термомагнитометр, чувствительность которого, обычно, достаточна для исследований образцов магматических горных пород основного состава (напр., базальтов), характеризующихся, как правило, довольно сильной величиной естественной остаточной намагниченности. Между тем, имеется широкий круг горных пород (гранитоиды, красноцветы и др.) исследование которых на данном приборе сталкивается с существенными трудностями, поскольку они намагничены часто значительно слабее основных магматических пород и чувствительности установки уже недостаточно для выполнения соответствующих измерений. То же касается и образцов, обычно используемых для археомагнитных исследований. Немало таковых достаточно сильно намагничены, для того, чтобы быть пригодными для измерений на трехкомпонентном магнитометре, в то же время, имеется довольно много объектов, перспективных для археомагнитных исследований, чьей намагниченности недостаточно для изучения их на этом уникальном приборе.

Таким образом, повышение чувствительности трехкомпонентного термомагнитометра производства ГО “Борок” является крайне актуальной задачей, решение которой позволило бы существенно расширить круг объектов, пригодных для палео-, петро- и археомагнитных исследований. Цель

настоящей работы состояла в изучении возможности повышения чувствительности термомагнитометра путём его модернизации в рамках существующей конструкции.

Методы и объекты

При исследовании возможности повышения чувствительности трёхкомпонентного термомагнитометра, в рамках имеющейся конструкции, в качестве объекта выступает прибор в целом, и модуль датчиков магнитного момента, в частности. В качестве основного метода повышения чувствительности рассматривалась возможность оптимизации магнитных свойств сердечников, используемых для изготовления датчиков магнитного момента, с целью повышения коэффициента передачи и уменьшения собственных шумов.

Полученные результаты

Работа, проведенная в рамках выполнения задачи 1.1. была, главным образом, направлена на определение возможности оптимизации датчиков магнитного момента в рамках существующей конструкции трехкомпонентного термомагнитометра.

Датчики магнитного момента, используемые в приборе в качестве чувствительных элементов, относятся к феррозондовому типу [Афанасьев, 1969; Киренский, 1967; Мишин, 1981]. В классическом понимании феррозонд представляет собой электрическую катушку, намотанную на удлиненный стержень из ферромагнетика, обладающего малой коэрцитивной силой и большой магнитной проницаемостью в слабых магнитных полях. Сердечники датчиков действующего прибора выполнены из пермаллоя 79НМ. Для выявления влияния материала сердечника на эффективность работы датчиков магнитного момента изготовлен лабораторный макет

(Рис. 1.1.), позволяющий оперативно менять сердечник и проводить сравнительные замеры полезного сигнала.



Рис. 1.1. Функциональная схема лабораторного макета для выявления влияния материала сердечника на эффективность работы датчиков магнитного момента.

Для проведения экспериментов в качестве источника постоянного магнитного поля изготовлен образец размером 10x10x10 мм, содержащий магнетит, намагниченный, практически, до насыщения в поле 2000 Э. Методика исследований влияния материала сердечника на эффективность работы датчика магнитного момента заключалась в следующем.

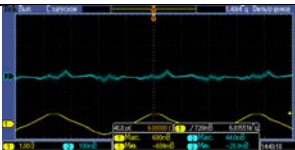
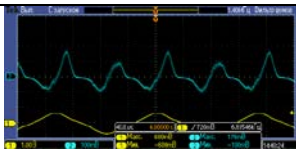
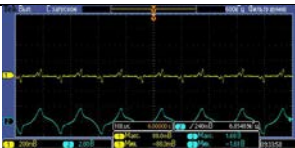
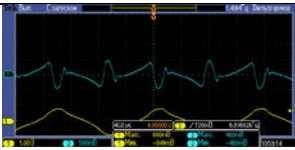
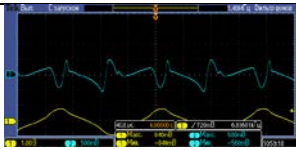
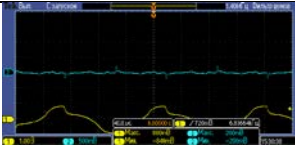
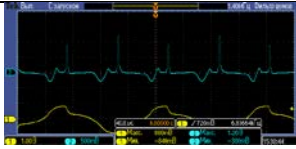
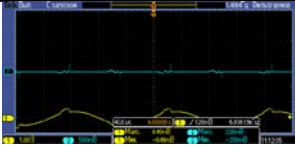
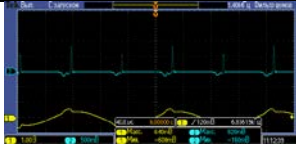
В макет датчика магнитного момента устанавливались сердечники из разных ферромагнитных сплавов, обладающих высокой магнитной проницаемостью. Затем с генератора, на обмотку возбуждения датчика, подавалось напряжение, вызывающее перемагничивание сердечника, при этом контролировался ток возбуждения. Далее, при помощи осциллографа, фиксировалась форма и уровень полезного сигнала на измерительной обмотке датчика магнитного момента для следующих случаев:

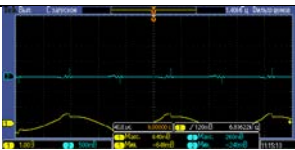
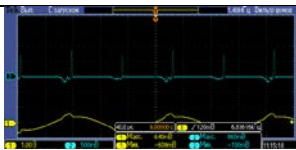
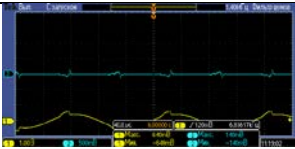
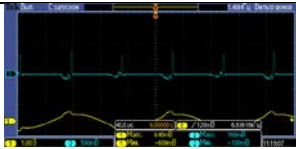
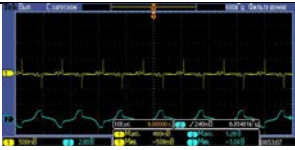
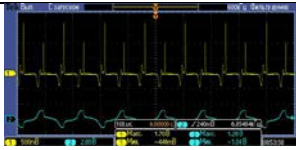
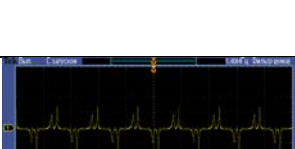
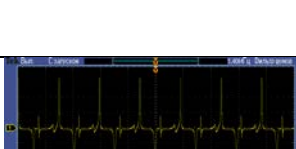
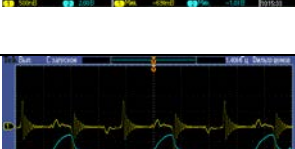
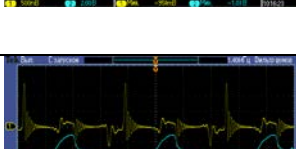
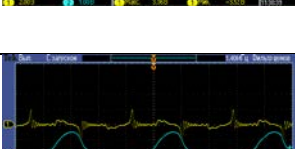
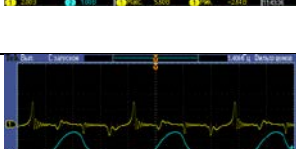
- а) отсутствие эталонного образца;
- б) эталонный образец находится на фиксированном расстоянии от макета датчика (магнитное поле образца направлено к датчику);

в) эталонный образец находится на фиксированном расстоянии от макета датчика (магнитное поле образца направлено от датчика);

На основании этих данных рассчитывался коэффициент передачи феррозондового датчика, который рассматривался в качестве меры чувствительности последнего. Всего выполнено более ста измерений, усреднённые результаты представлены в Таблице 1.1.

Таблица 1.1. Результаты исследования влияния материала сердечника на эффективность работы датчика магнитного момента.

Материал сердечника	Коэффициент передачи	Полезный сигнал	
		Без образца	С образцом
Супермаллой	4.4		
Супермаллой	5		
Пермаллой 79НМ	1.2		
Пермаллой 83НФ	6.0		
Пермаллой 79НМ	3.8		

Материал Сердечника	Коэффициент передачи	Полезный сигнал	
		Без образца	С образцом
Пермаллой 79НМ	3.4		
Пермаллой 79НМ	5.3		
Пермаллой 79НМ	3.5		
КНСП	2.4		
ГМ 501	1.7		
ГМ 503А	1.7		

Обсуждение результатов и выводы

Проведённые исследования позволяют сделать вывод о том, что наибольшим коэффициентом передачи обладают феррозондовые датчики магнитного момента с сердечниками из таких сплавов, как пермаллой 83НФ, 79НМ и супермаллой.

Важно отметить, однако, что состав материала сердечников является важным, но не единственным параметром, определяющим получение достаточно высокого коэффициента передачи. Для этого также необходимо, чтобы сердечники, используемые в датчиках магнитного момента, не имели механических деформаций и обладали одинаковыми магнитными свойствами по всему объёму. К сожалению, выполненные нами измерения показали, что качество изготовления доступных феррозондовых датчиков не отвечает этим требованиям.

Проведенный нами информационный поиск по отечественным предприятиям, изготавливающим изделия из ферромагнитных материалов, показал, что в настоящий момент на этих предприятиях отсутствуют отработанные технологии, позволяющие получить сердечники с малой коэрцитивной силой и большой магнитной проницаемостью в слабых магнитных полях, с однородными магнитными свойствами по всему объёму.

Выполнять же специальные работы для изготовления сердечников заданных параметров малыми сериями эти предприятия не готовы из-за высоких накладных расходов.

Для получения качественных датчиков с однородными свойствами можно было бы заказать изготовление большой партии сердечников с последующим экспериментальным отбором из них экземпляров, использование которых позволяет получить удовлетворительную форму сигнала и достаточно высокий коэффициент передачи. Отметим, что поскольку в трёхкомпонентном термомагнитометре используется несколько датчиков магнитного момента, необходимо, чтобы различия магнитных характеристик у используемых сердечников, были минимальными. Следовательно, при очевидных значительных затратах, реализация такого подхода не может гарантировать достижения желаемого результата.

Таким образом, повышение чувствительности существующих датчиков на базе отечественных материалов в настоящее время не представляется возможным, закупка же импортных материалов связана с существенными затруднениями.

Задача 1.2. Разработка и отладка передовых протоколов для археоманнитных экспериментов с использованием аппаратуры “Triaxe” и трехкомпонентного термомагнитометра, производства ГО «Борок».

Актуальность проблемы

Многочисленные эксперименты по определению напряженности геомагнитного поля древних эпох с помощью метода Телье или его модификаций вполне определенно показывают, что неучет магнитной анизотропии при образовании термоостаточной намагниченности может приводить к искажениям результатов, величина которых может составлять до 20-30 процентов от истинных значений древнего поля. Наиболее остро этот вопрос стоит при археоманнитных исследованиях, что связано со спецификой археоманнитного материала и особенностей его производства [Rogers et al., 1979; Aitken et al., 1981; Veitch et al., 1984; Chauvin et al., 2000; Tema, 2009].

Современные археоманнитные исследования требуют обязательного выполнения коррекции анизотропии, а данные, полученные без применения этой процедуры, не принимаются к публикации в авторитетные научные журналы. Трехкомпонентный термомагнитометр системы ГО “Борок” является крайне перспективным прибором для выполнения экспериментов по определению величины древнего магнитного поля, как древних геологических эпох (палеомагнетизм), так и исторического времени (археомагнетизм). Однако, для того, чтобы использовать трехкомпонентный термомагнитометр для выполнения этих экспериментов, крайне необходимо произвести модернизацию прибора и соответствующих измерительных протоколов таким образом, чтобы при выполнении измерений производилась коррекция анизотропии.

Метод и результаты

Существует несколько способов коррекции магнитной анизотропии [Veitch et al, 1984; Бураков, 2000], однако все эти способы до последнего времени оставались достаточно трудоемкими и времязатратными. С появлением аппаратуры и протокола “Triaxe” [Le Goff and Gallet, 2004] появилась возможность существенно ускорить эту процедуру и перевести ее в автоматический режим. Общие принципы, положенные в основу коррекции анизотропии на аппаратуре “Triaxe” были использованы для разработки соответствующего протокола и аппаратурного блока для отечественного трехкомпонентного магнитометра системы ГО “Борок”, с учетом его существенных отличий от французского аналога.

В первом приближении, предложенная процедура автоматической коррекции анизотропии состоит в следующем.

На первых этапах измерений, при разрушении (терморазмагничивании) естественной остаточной намагниченности термоостаточной природы, автоматически происходит определение направления вектора этой намагниченности. На следующем этапе эксперимента, при создании лабораторной термоостаточной намагниченности к образцу прикладывается магнитное поле, направление которого соответствует направлению разрушенной природной термоостаточной намагниченности. При остывании образца в таком поле до некоторой температуры (которая определяется экспериментатором), в нем образуется лабораторная остаточная намагниченность, направление которой автоматически определяется и сравнивается с направлением намагничивающего поля. В случае отклонения направления намагниченности от направления намагничивающего поля (в результате явления анизотропии), направление намагничивающего поля смещается в сторону, противоположную отмеченному отклонению на измеренный угол отклонения и процедура создания лабораторной термоостаточной намагниченности повторяется.

Серьезной проблемой при реализации этой процедуры на трехкомпонентном термомагнитометре ГО “Борок” являлось принципиальное отличие

способов измерения магнитного момента, используемых в трехкомпонентном термоманометре (феррозонды) и во французской системе “Triaxe” (индуктивные катушки). В результате непрерывное измерение магнитного момента при охлаждении образца в присутствии магнитного поля при создании термостатической намагниченности, реализуемое на установке “Triaxe” было невозможно на трехкомпонентном термоманометре. Для решения этой проблемы было предложено измерение направления создаваемой лабораторной намагниченности при фиксированной температуре, отвечающей нижней границе интервала создания намагниченности. Для повышения точности измерения было существенно увеличено время накопления сигнала.

Важной технической проблемой при этом было создание в рамках уже существующей конструкции аппаратного блока, позволяющего вращать магнитное поле в объеме исследуемого образца.

Магнитное поле в некотором объеме может быть создано с помощью постоянных магнитов, электромагнитов и катушек индуктивностей. Постоянные магниты не требуют энергии, но не дают возможности эффективно и просто управлять величиной магнитного поля. Получаемая магнитная индукция определяется остаточной намагниченностью материала магнита, и для разных материалов может иметь разные значения до величин порядка одного Тесла. Для получения полей порядка 0.1-1Т в лабораторной практике широко используются электромагниты, т.е. катушки индуктивности, имеющие сердечники чаще всего из специальной стали. Относительная магнитная проницаемость стали может достигать величины нескольких тысяч (у чистого железа до 20000). Таким образом, сравнительно малым током можно вызвать большую намагниченность сердечника и получить в зазоре электромагнита магнитное поле с величиной индукции на несколько порядков выше, чем она была бы в такой же катушке без сердечника.

В нашем случае, в системе генерации магнитного поля нельзя использовать магнитные материалы, т.к. они будут нарушать работу датчиков магнитного момента, которые используются для измерения исследуемых образцов. Таким образом, наиболее приемлемым является способ формирования магнитного поля при помощи постоянного электрического тока, протекающего через обмотки катушек индуктивности без сердечников. Например, можно использовать соленоид, катушки Гельмгольца. В существующей конструкции трехкомпонентного термомагнитометра уже реализована возможность создания управляемого магнитного поля в направлении оси Z при помощи соленоида, который установлен в модуле датчиков магнитного момента (Рис. 2.1.). Необходимо было спроектировать систему создания управляемого магнитного поля по осям X и Y таким образом, чтобы её можно было расположить в объёме между наружной поверхностью соленоида и внутренней поверхностью пермаллового экрана № 1 (Рис. 2.2., Таблица 2.1.).

Наиболее оптимальным вариантом является использование катушек Гельмгольца. В пространстве между катушками (Рис. 1) при протекании через них электрического тока создаётся магнитное поле высокой однородности, причем, в отличие от соленоида, доступ в рабочую область открыт по двум взаимно перпендикулярным осям. Магнитную индукцию B в центре системы можно рассчитать по формуле:

$$B=0.716\mu_0 \cdot I \cdot N/R,$$

где N – число витков в каждой катушке, I – ток через катушки, R – средний радиус катушки.

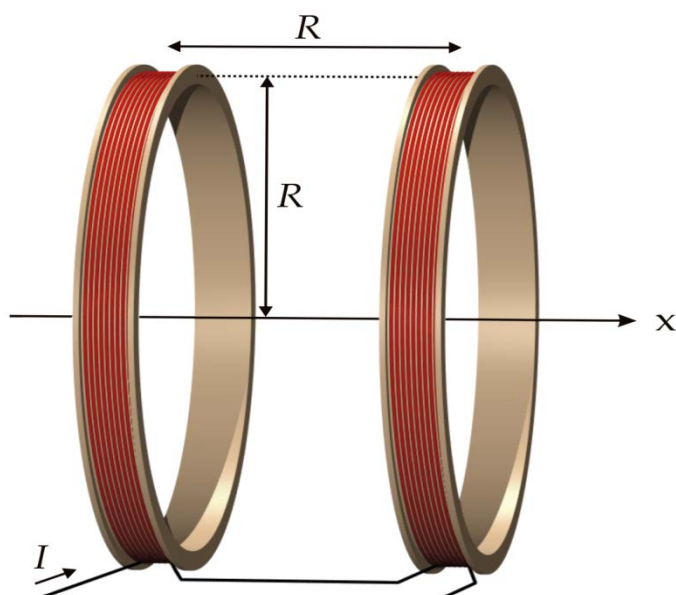


Рис.2.1. Катушки Гельмгольца.

Размещение катушек Гельмгольца круглой формы в существующей конструкции трехкомпонентного термоманометра является невозможным из-за малых размеров внутреннего магнитного экрана, поэтому оптимальным вариантом будет использование катушек Гельмгольца овальной формы. Способ формирования магнитного поля в направлении X и Y показан на Рис. 2.3.

В существующей конструкции трехкомпонентного термоманометра уже реализована возможность создания управляемого магнитного поля в направлении вертикальной оси Z при помощи соленоида, который установлен в модуле датчиков магнитного момента (Рис. 2.2.). Для генерации магнитных полей в направлении X и Y в ходе проведенных работ разработана конструкция из двух пар катушек Гельмгольца, размещённых взаимно перпендикулярно в объёме между наружной поверхностью соленоида и внутренней поверхностью пермаллового экрана № 1 (Рис. 2.2., Таблица 2.1.).

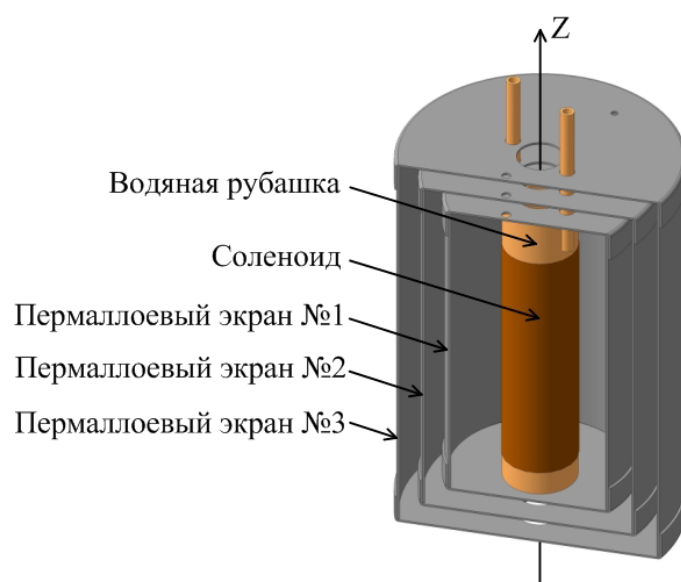


Рис. 2.2. Модуль датчиков магнитного момента трехкомпонентного терромагнитометра системы ГО "Борок".

Таблица 2.1. Размеры модуля датчиков магнитного момента трехкомпонентного терромагнитометра системы ГО "Борок".

Пермалловый экран № 1		Соленоид	
Диаметр внутренний, мм	78	Диаметр внешний, мм	33
Длина, мм	140	Длина, мм	105

Параметры катушек Гельмгольца выбраны таким образом, чтобы значение создаваемого магнитного поля было не менее 2 Э, а для управления величиной и знаком магнитного поля можно было использовать электронные модули, аналогичные уже установленному в трёхкомпонентном терромагнитометре модулю управления полем соленоида.

Таким образом, в результате выполненных работ была разработана конструкция системы создания магнитных полей в трёх направлениях (Рис. 2.3.).

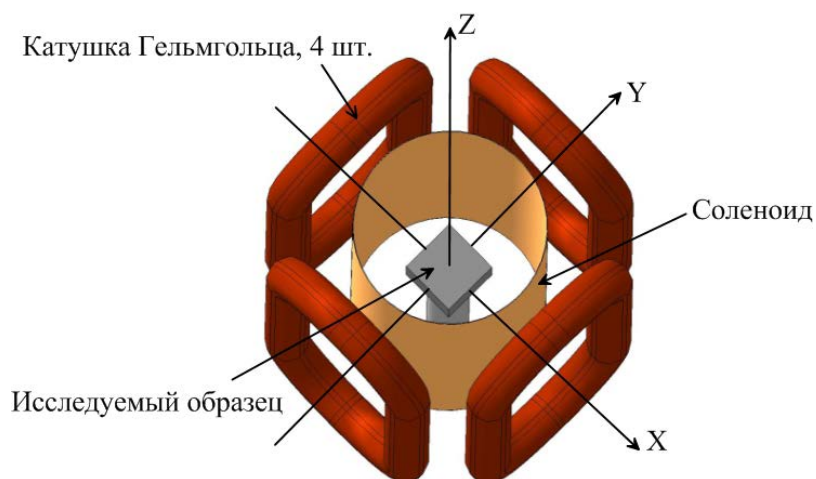


Рис. 2.3. Конструкция системы создания магнитных полей в трёх направлениях.

Для экспериментальной проверки работоспособности системы формирования в рабочем объёме управляемого магнитного поля по осям X и Y был изготовлен действующий макет. В качестве управляющего воздействия использовался цифровой код цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) от 0 до 4095.

Таблица 2.2. Результат экспериментальной проверки работоспособности системы формирования в рабочем объёме управляемого магнитного поля по осям X и Y.

Код ЦАП	Магнитного поле, Э (Направление X)	Магнитного поля, Э (Направление Y)
0	-2.4	-2.1
512	-2.2	-2.0
1024	-1.5	-1.4
1536	-0.7	-0.7
2048	0	0
2560	0.7	0.7

3072	1.5	1.4
3584	2.2	2.0
4095	2.4	2.1

Результаты испытаний приведены в Таблице 2.2. Формирование магнитного поля по оси Z экспериментально не проверялось, т.к. схема на основе соленоида успешно функционирует в трёхкомпонентном термомагнитометре (изготовлен в ГО «Борок» ИФЗ РАН).

Для управления магнитным полем и реализации измерительного протокола был создан специальный программный модуль, позволяющий в автоматическом режиме выполнять измерения направлений остаточной намагниченности и выполнять автоматическую коррекцию анизотропии.

Таким образом, в результате проведенной модернизации существенно расширены функциональные возможности трёхкомпонентного термомагнитометра системы ГО «Борок», создан не имеющий аналогов в России прибор, который позволяет существенно увеличить производительность и эффективность научных исследований в области магнетизма, палео- и археомагнетизма.

Задача 1.3. Установление критериев и методов для диагностики вторичной намагниченности в магматических горных породах.

Актуальность проблемы

Задачи палеомагнетизма решаются путём расшифровки информации о характеристиках геомагнитного поля, записанной в древних горных породах, при этом разделение первичной и метакронной компонент намагниченности является необходимым условием для адекватной интерпретации палеомагнитной записи. Определение напряженности древнего геомагнитного поля, а также решение многих важных задач палеомагнетизма возможно лишь при условии отсутствия в исследуемых объектах метакронных видов остаточной намагниченности, среди которых особое место занимает химическая остаточная намагниченность (CRM), образующаяся в результате химических изменений магнитных минералов в присутствии внешнего поля **В**. Поэтому разработка критериев диагностики этого вида намагниченности является первоочередной задачей палеомагнетизма и магнетизма горных пород.

Объекты исследования, методика экспериментов и численного моделирования

Разработка критериев диагностики CRM особенно важна для магматических пород, по которым выполняются определения напряженности древнего магнитного поля. Для решения проблемы диагностики в таких породах необходимо, в первую очередь, решить следующие задачи:

Задача 1. Экспериментальные исследования особенностей формирования CRM и выполнение детальных экспериментов по определению палеонапряжённости методом Телье-Коэ на образцах, содержащих этот вид намагниченности.

Задача 2. Теоретический анализ механизмов формирования CRM.

Задача 1. Для экспериментов отбирались образцы, содержащие титаномагнетит (ТМ) с температурой Кюри T_c около 200 °С. Каждый образец нагревался до выбранной температуры реакции $T_{CRM} = (350-550)$ °С, где включалось внешнее магнитное поле 50 мкТ, в результате чего в нём в процессе химических изменений, связанных с окислением титаномагнетита, возникала CRM. В процессе формирования CRM выполнялся мониторинг ее величины в интервале времени t от 5 минут до 200 часов. По истечении заданного времени образец охлаждался до комнатной температуры. Затем на этих образцах проводились эксперименты Телье в версии Коэ по определению поля образования (B_{lab}) лабораторной CRM.

Задача 2. Численное моделирование процесса образования CRM в системе однодоменных (ОД) взаимодействующих частиц проводилось методом Монте-Карло, принципы таких расчётов изложены, например, в работе [Shcherbakov et al., GRL, 1996].

Результаты

Задача 1. Взятые в совокупности, все установленные экспериментальные закономерности однозначно указывают на следующий универсальный характер изменений, которым оказалась подвержена относительно крупная псевдооднодоменная (ПОД) и многодоменная (МД) титаномагнетитовая (ТМ) фракция базальтов, взятых из разных районов земного шара: при выполненных на воздухе лабораторных нагревах вначале происходит однофазное окисление ТМ с образованием катион-дефицитных фаз с последующим их распадом на ильменитовые ламелли и магнетитовые ячейки. Причем последний процесс, согласно проведенным магнитометрическим измерениям, начинается, по-видимому, уже после 100-часовой выдержки исходных образцов при 400 °С и не более чем через 30 минут в ходе же отжига при 500 °С, где его

роль в изменении магнитных свойств изученных базальтов является доминирующей. Пример кинетики процесса приобретения CRM на ТМ фракции базальтовых пород представлен на Рис. 3.1., образец сибирских траппов. Для сравнения здесь же показаны и изменения со временем спонтанной намагниченности M_s .

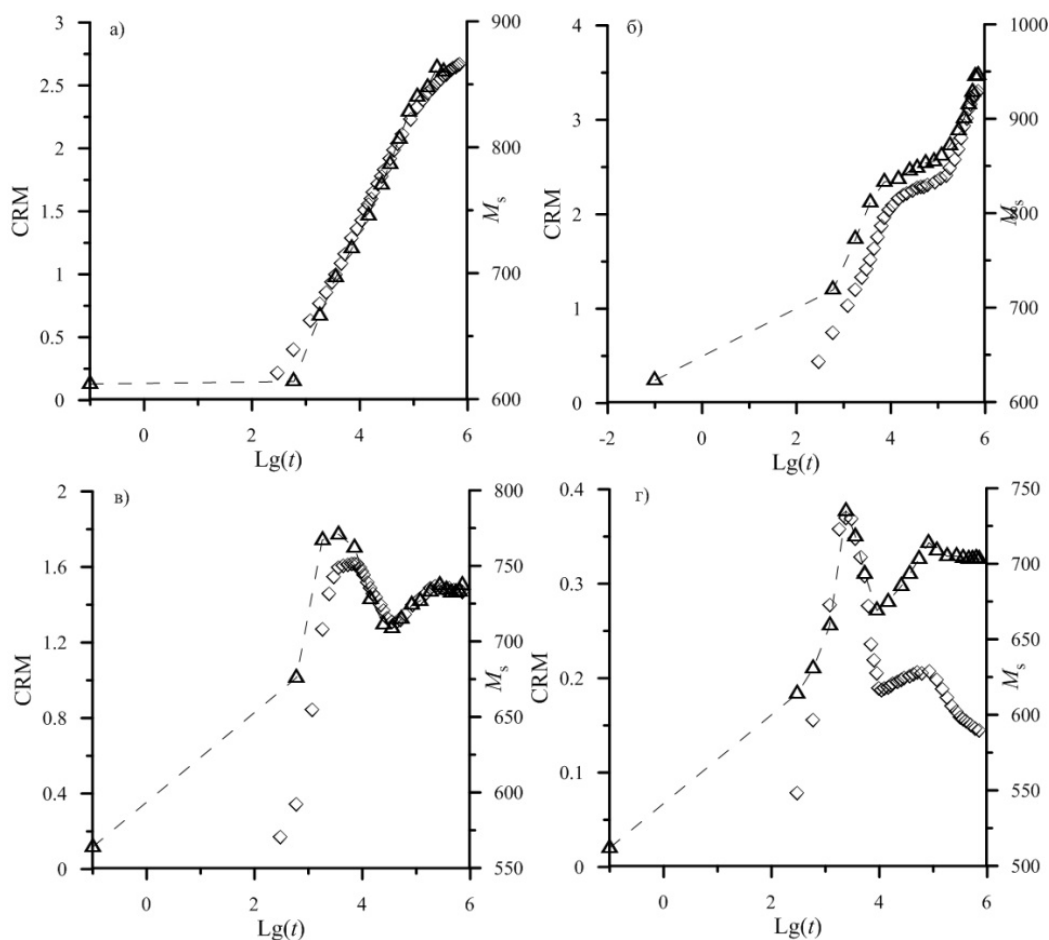


Рис. 3.1. Корреляционная связь между величиной $CRM(t)$ (шкала слева, ромбы) и $M_s(t)$ (шкала справа, треугольники) в процессе изотермического отжига образца. а) $T_{CRM} = 400^\circ C$, б) $T_{CRM} = 450^\circ C$, в) $T_{CRM} = 500^\circ C$, г) $T_{CRM} = 530^\circ C$. За M_s здесь принималась намагниченность насыщения дубликата образца, измеренная при комнатной температуре (T_r) в поле 0.65 Т. Намагниченность выражена в А/м.

Экспериментальные диаграммы Араи-Нагата, полученные по CRM, обычно имеют значительный квазилинейный участок в интервале от некоторой температуры, превышающей температуру создания CRM до температур, близким к температуре Кюри. «Палеонапряжённость», определённая по линейным участкам диаграмм Араи-Нагата, оказывается заметно заниженной по сравнению с «истинным» полем создания CRM (Рис. 3.2.).

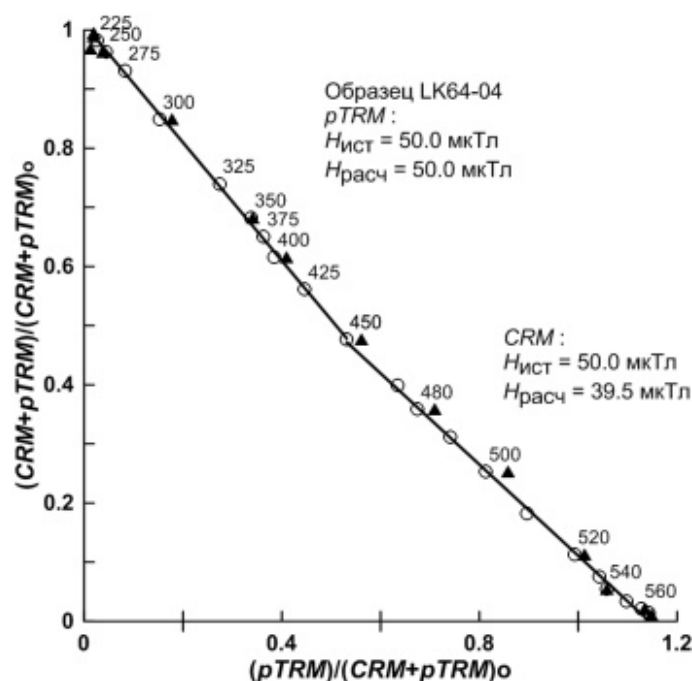


Рис. 3.2. Диаграмма Араи-Нагата образца с лабораторной намагниченностью CRM+pTRM. CRM создавалась при $T_{CRM} = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ в поле $H_{ист} = 50\text{ мкТл}$ в течение 200 часов. pTRM – термоостаточная намагниченность, возникающая в образце при его охлаждении от температуры создания CRM до комнатной температуры.

Задача 2. Согласно имеющимся теоретическим представлениям, образование CRM может происходить через механизм роста объёма мелких суперпарамагнитных (СПМ) зёрен, когда при выдержке при некоторой температуре T и в присутствии внешнего поля $\mathbf{B}$ их объём вырастает до блокирующего объёма v_b . Несмотря на большую распространённость такого сценария, он мало

исследован как экспериментально, так и теоретически. Нами выполнено численное моделирование методом Монте-Карло процесса образования CRM в системе однодоменных (ОД) взаимодействующих частиц (Рис. 3.3.), подтверждающее указанную схему.

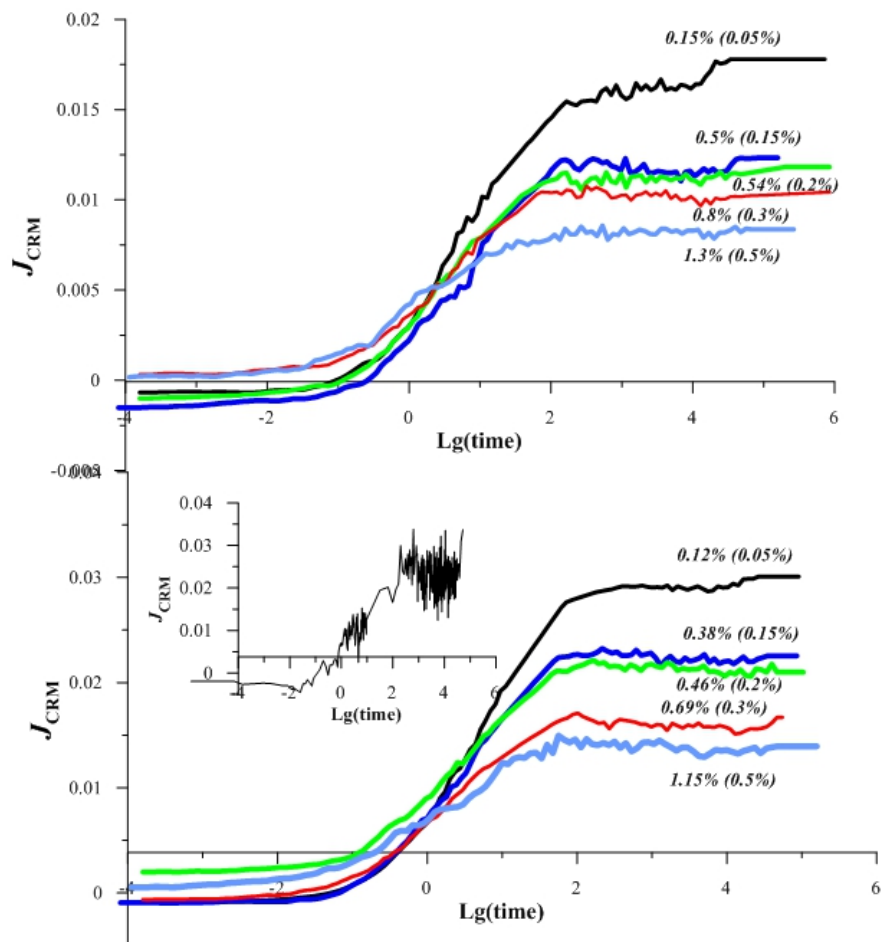


Рис. 3.3. Мониторинг приобретения $J_{CRM}(t)$ в ансамбле ОД взаимодействующих зерен в зависимости от их объемной концентрации. Верхний рисунок - графики для температуры кристаллизации $T_{CRM}=400^\circ C$, нижний - для $500^\circ C$, на врезке для примера представлен результат для одного Монте-Карло испытания. Значения относительной объемной концентрации для каждой кривой указаны на рисунке.

Обсуждение результатов.

Наиболее существенный вывод из экспериментов по созданию CRM на ТМ фракции базальтовых пород заключается в том, что процесс её приобретения происходит на относительно коротком начальном временном интервале отжига, а именно: на этапе однофазного окисления. При дальнейшей выдержке изменения CRM в основном лишь повторяют изменения со временем спонтанной намагниченности M_s (Рис. 3.1., образец сибирских траппов).

Это означает, что механизм формирования CRM на таких породах связан отнюдь не с ростом размеров частиц, как это обычно принимается. Наши эксперименты показывают, что возникновение CRM здесь происходит за счёт роста температуры Кюри T_c однофазно окисляющихся зёрен ТМ. Дело в том, что при нагреве до температуры реакции (в данном случае это 500°C) образцы вначале переходят в парамагнитное состояние. Выдержка при высокой температуре приводит к их быстрому однофазному окислению с соответствующим ростом T_c до T_{CRM} и выше, в результате чего зёрна становятся вновь ферромагнитными и приобретают остаточную намагниченность. Механизм приобретения этой намагниченности сейчас неясен и ждёт дальнейшего исследования, что и предполагается сделать на следующем этапе выполнения данного гранта.

Наиболее существенный вывод из экспериментов Телье заключается в том, что на всех диаграммах Араи-Нагата для CRM в высокотемпературной области (иногда вплоть до температуры Кюри T_c) выделяется вышеупомянутый квазилинейный участок, сходный с таковым, который мог бы образоваться в случае, если бы образец имел первичную термоостаточную намагниченность. Таким образом, наличие прямолинейного участка на диаграммах Араи-Нагата может быть неверно интерпретировано, как указание на присутствие первичной термоостаточной намагниченности. Таким образом, химическое намагничивание (или перемагничивание), если оно имело место в процессе магнитоминералогических преобразований титаномагнетитсодержащих

магматических пород в ходе их длительного остывания, либо при вторичных прогревах, может привести к неверным результатам при определении интенсивности геомагнитного поля в геологическом прошлом.

Селекция таких данных осложняется тем, что общепринятые формальные признаки их надёжности зачастую выполняются, что делает крайне затруднительным дискриминацию этих ложных данных. В палеомагнитном аспекте это означает, что ряд определений палеонапряжённости, присутствующих в Мировой Базе Данных по палеонапряжённости могут нести ложную информацию о поведении интенсивности геомагнитного поля в прошлом. На такую возможность указывалось в работе [Khokhlov, 2015], где на основании статистического анализа 392 данных по палеонапряжённости для эпохи Брюнеса пришли к выводу, что около 40 из них дают заниженную величину палеополя.

Переходя к обсуждению результатов компьютерного моделирования, заметим, что выход кривых $J_{CRM}(t)$ на насыщение (т.е. длительность формирования намагниченности) мало зависит от концентрации зёрен, то есть от величины магнитостатического взаимодействия (Рис. 3.3.). Однако, взаимодействие сильно сказывается на величине CRM, относительная величина которой падает с ростом концентрации зёрен приблизительно в 3 раза вследствие резкого увеличения интенсивности случайного поля взаимодействия, создаваемых окружающими зёрнами на каждой данной частице. При этом, разумеется, абсолютная величина CRM растёт с увеличением концентрации зёрен.

Одним из определяющих свойств любого вида остаточной намагниченности являются её спектры блокирующих (T_b) и деблокирующих (T_{db}) температур. В литературе неоднократно высказывалось предположение о том, что TRM и CRM могут иметь схожую температурную стабильность, т.е. похожие спектры деблокирующих температур T_{db} . Если это верно, тогда эти виды намагниченности будут плохо различимы в процессе экспериментов по мето-

дикам Телье или Вильсона-Буракова, что может привести к получению ложных определений палеонапряжённости (см., например, [Stacey and Banerjee, 1974; Smirnov and Tarduno, 2005]).

Для проверки этого предположения нами проведено сравнение спектров деблокирующих температур путём компьютерного моделирования процесса терморазмагничивания «образованных» CRM и TRM. Для определения блокирующей температуры T_b при «термонамагничивании» фиксировалась та температура, при которой произошел последний переворот частицы при охлаждении ансамбля. Соответственно, для определения деблокирующей температуры T_{db} при «терморазмагничивании» CRM или TRM фиксировалась та температура T_{db} , при которой произошел первый переворот частицы. Результаты расчётов спектров T_{db} показывают, что спектры деблокирующих температур CRM и TRM имеют очень большое сходство, тем самым свидетельствуя в пользу предположения о слабой различимости CRM и TRM при определении палеонапряжённости по методике Телье.

Выводы

1. Образование CRM на ТМ фракции базальтовых пород происходит ещё на этапе однофазного окисления на относительно коротком начальном временном интервале отжига, а именно, от нескольких минут до 10 суток, если температура выдержки изменятся в интервале от 350 до 550 °С.

2. «Палеонапряжённость», определённая методом Телье на образцах, содержащих CRM, может быть в 2-3 раза заниженной по сравнению с истинным полем создания CRM.

3. Компьютерное моделирование процессов образования CRM и TRM подтвердило предположение о том, что их спектры деблокирующих температур сходны, что говорит о слабой различимости CRM и TRM при определении палеонапряжённости по методике Телье.

4. Из совокупности экспериментальных и теоретических результатов следует, что задача установления критериев для диагностики для CRM требует развития более тонких подходов, нежели простое сравнение их кривых термо-размагничивания.

Задача 1.4. Археоманнитное древнейших памятников человеческой цивилизации Ярим-Тепе 1 и Ярим-Тепе 2 с целью детализация записи изменений напряженности геомагнитного поля в 6 и 7 тысячелетиях до нашей эры.

Введение

Возможность существования очень значительных по амплитуде, быстрых вариаций напряженности геомагнитного поля с характерными временами порядка десятков – первых сотен лет (“археоманнитных джерков” [Gallet et al., 2003] и “геомагнитных спайков” [Ben Iosef et al., 2009]) активно обсуждается в геомагнитном и палеомагнитном сообществах.

«Археоманнитные джерки» были впервые выявлены Галле с соавторами [Gallet et al., 2003] в археоманнитной летописи Западной Европы, и характеризуются весьма быстрыми (первые сотни лет) вариациями напряженности и направления геомагнитного поля. Геомагнитные «спайки» были открыты Бен-Йозефом с соавторами [Ben Iosef et al., 2009] при изучении археоманнитной истории Леванта. Они представляют собой рывки напряженности геомагнитного поля, характеризующиеся скоростью вариаций напряженности, превышающей современную более чем в 40 раз ($\sim 4\text{--}5\text{ }\mu\text{T}$ в год: [Livermore et al., 2014; Ben-Yosef et al., 2009; [Shaar et al., 2011]). Цель настоящего исследования состояла в проверке существования археоманнитных джерков и геомагнитных спайков и в определении их характеристик. Подтверждение реальности этих геомагнитных явлений может привести к существенной корректировке наших представлений о процессах, происходящих во внешнем ядре Земли, о процессах генерации магнитного поля нашей планеты.

Объекты, методика исследования

В рамках настоящего исследования нами были изучены археологические памятники Ярым Тепе I и II, которые представляют из себя древние многослойные поселения, расположенные на территории современного Северного Ирака, в 50-ти километрах к западу от г. Мосул (Рис. 4.1.).

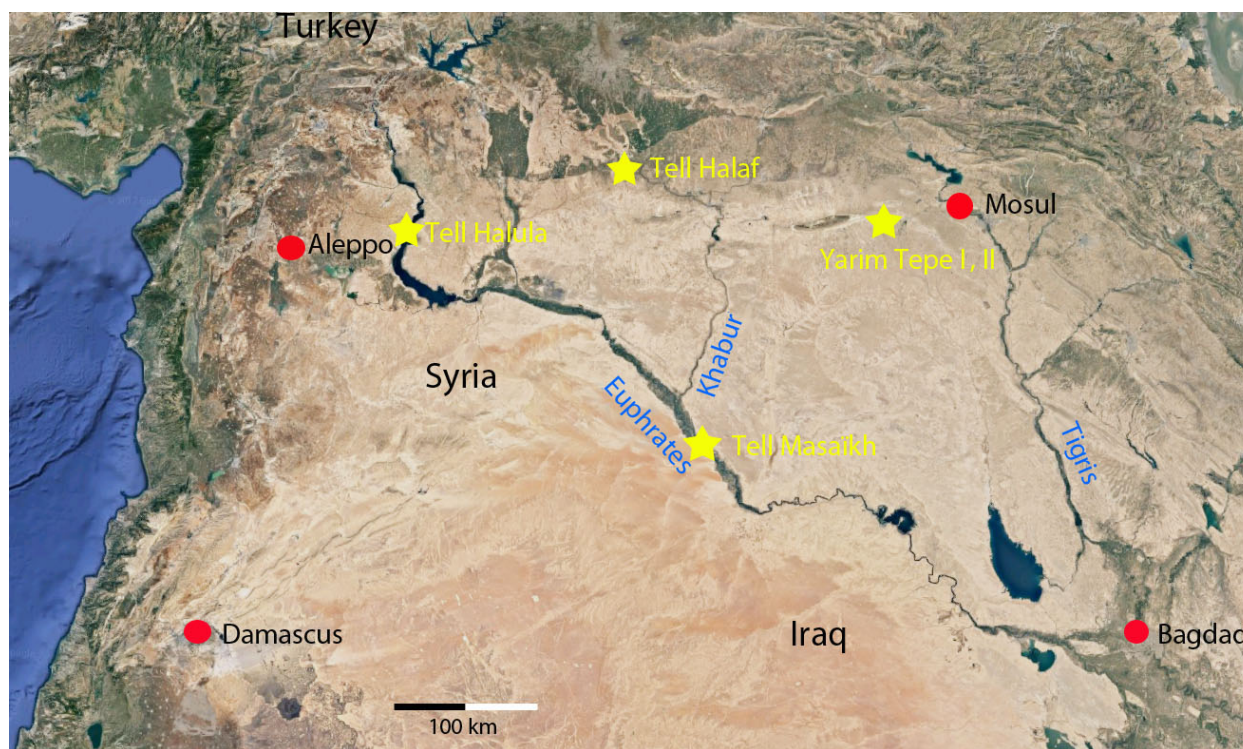


Рис. 4.1. Географическое положение археологических памятников Ярым Тепе I и II.

Керамический материал, изученный нами, был собран в ходе советских археологических экспедиций, выполнявшихся с 1969 по 1976 гг. под руководством Р.М. Мунчаева [Мунчаев и Мерперт, 1981]. Данные археологических исследований показали, что этот материал относится к трем последовательно существовавшим на данной территории поздненеолитическим культурам: Хассунской, Халафской и Убейдской. Культурные отложения Ярым Тепе I разделены археологическими методами на 12 строительных горизонтов, их общая мощность составляет примерно 6,5 м. Ярым Тепе II имеет 7-ми метровую

толщ культурных отложений, разделенных на 9 строительных горизонтов. Все строительные горизонты датированы на основе типоморфологии керамического материала, а также изучения построек и сооружений. Формирование этих поселений происходило в позднем неолите в интервале времени между 6300 и 5000 лет до н.э.

Нами было отобрано 30 групп фрагментов из поселения Ярым Тепе II и 16 групп из поселения Ярым Тепе I из последовательных стратиграфических уровней, мощностью в среднем приблизительно 20 см. Каждая группа состоит из минимум 3-х, максимум 13-ти керамических фрагментов.

Измерения проводились при помощи протокола, разработанного М. Ле Гоффом и И. Галле [Le Goff et Gallet, 2004] для трехосного вибрационного магнитометра Triaxe. Данный магнитометр позволяет проводить измерения небольших образцов цилиндрической формы ($<1\text{ см}^3$), нагревая их непрерывно до высоких температур (до 700°C), в магнитном поле вплоть до $\sim 200\text{ }\mu\text{T}$. В нашем случае, температурный интервал измерения ($T_1 - T_2$) был выбран таким образом, чтобы с одной стороны размагнитить максимальное количество магнитной фракции для получения удовлетворительной записи, с другой стороны – максимально избежать изменений минерального состава в высокотемпературном интервале. В ходе измерений производились поправки за магнитную анизотропию и за скорость охлаждения образца [Genevey et al., 2009]. Нами измерялись как правило по три цилиндрических образца из каждого керамического фрагмента.

Для определения минералогического состава магнитной фракции нами был проведен ряд дополнительных анализов. Были получены кривые изотермической остаточной намагниченности (IRM), приобретаемой образцами в поле до 1Т, петли гистерезиса, а также получены кривые зависимости магнитной восприимчивости от температуры. Результаты данных анализов показали, что основными носителями магнитного сигнала в образцах являются минералы группы титаномагнетита. Кроме того, кривые зависимости магнитной

восприимчивости от температуры показали, что при нагреве образцов до высоких температур ($\sim 580^{\circ}\text{C}$) не происходит существенных изменений минерального состава образца.

Результаты измерений

Из коллекции Ярым Тепе II нами был измерен в общей сложности 181 фрагмент (561 образец). Среди них данные, удовлетворяющие критериям отбора, были получены по 114 фрагментам (321 образец). Таким образом, показатель эффективности составляет примерно 63%. Предыдущие археомагнитные исследования Халафских поселений в Сирии, проведенные Галле с соавторами [Gallet et al., 2015] имели схожий высокий показатель эффективности, что говорит в пользу Халафской керамики как объекта археомагнитных исследований.

Кривая вариаций напряженности для шестого тысячелетия до н.э., показанная на Рис. 4.2., имеет отчетливо ступенчатый характер эволюции, с явным трендом падения напряженности на $\sim 12\text{ }\mu\text{T}$ на стратиграфическом уровне примерно 5 м.

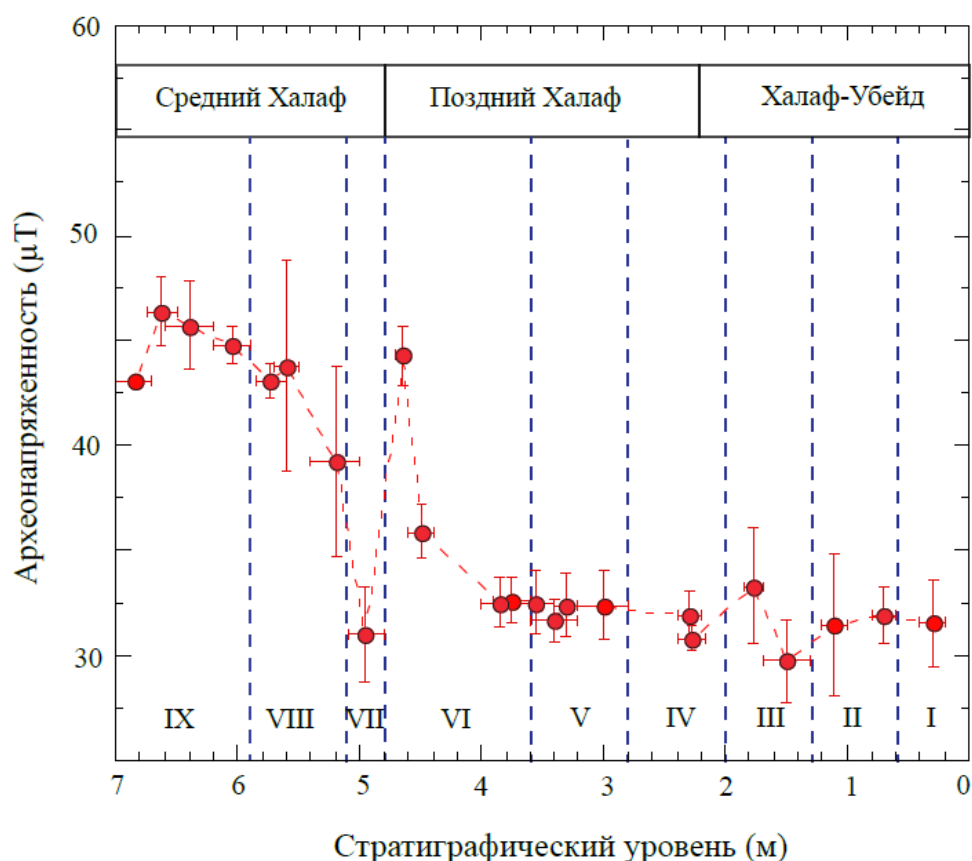


Рис. 4.2. Кривая вариаций напряженности для шестого тысячелетия до н.э. по данным исследования археологического памятника Ярым Тепе II.

При этом, на фоне общего резкого падения археонапряженности выше указанного уровня, на графике виден резкий пик напряженности, наблюдаемый в узком стратиграфическом интервале $\sim 4.60 - 4.70$ м (VII строительный горизонт).

Результаты археонапряженности коллекции памятника Ярым Тепе I, удовлетворяющие всем критериям отбора данных, были получены по 12 группам фрагментов (74 фрагмента, 233 образца), охватывающих практически все представленные в разрезе строительные горизонты. Таким образом, показатель эффективности исследования составляет $\sim 68\%$, что сопоставимо с таковым, рассчитанным для археомагнитных исследований Халафской керамики на территории Сирии и Ирака [Gallet et al., 2015; Yutsis-Akimova et al., 2018]. Учитывая тот факт, что данные керамические фрагменты являются одними из

наиболее древних в мире, данный показатель эффективности исследования является весьма высоким. Новые данные археонапряженности, полученные по Ярым Тепе I, относительно их стратиграфического положения в разрезе показаны на Рис. 4.3.

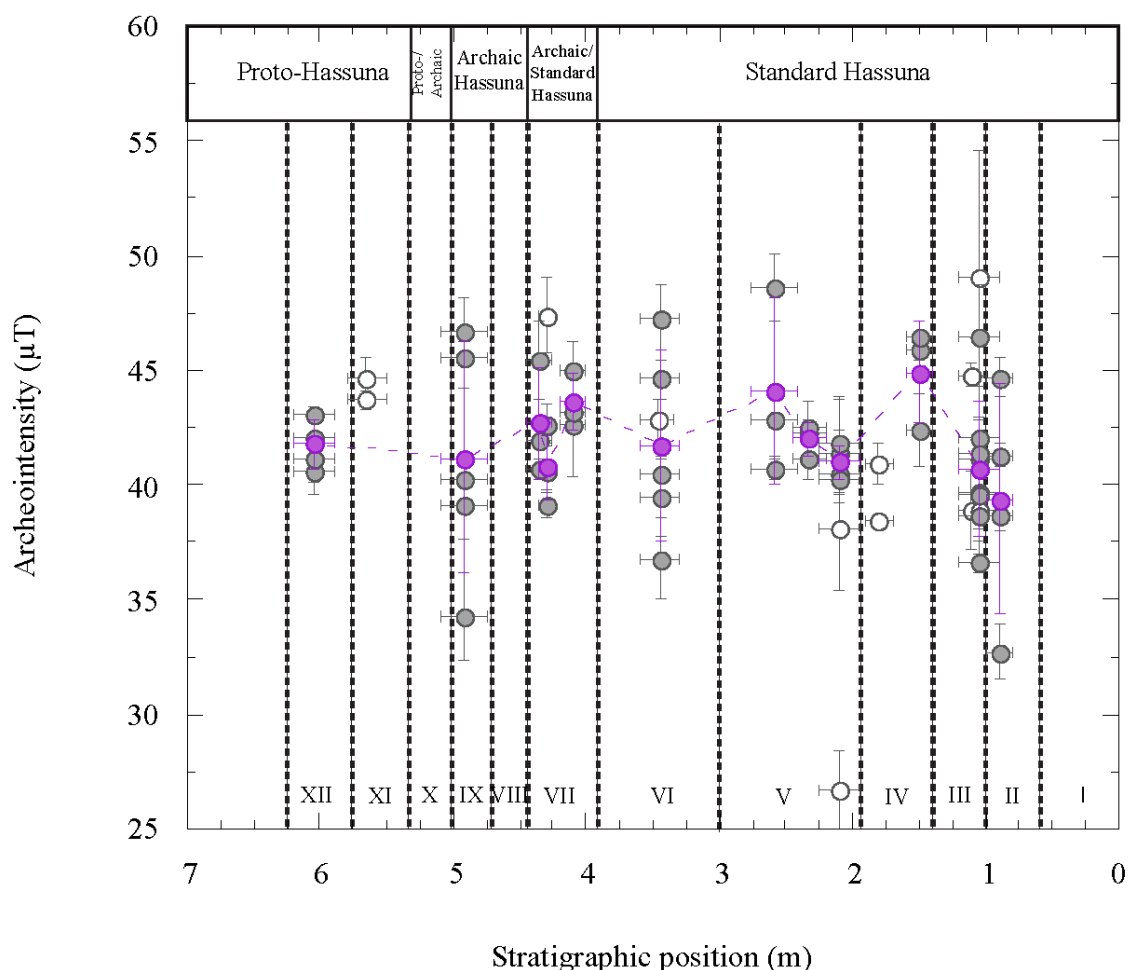


Рис. 4.3. Вариации напряженности геомагнитного поля по данным исследования археологического памятника Ярым Тепе I.

Датирование разреза

Основываясь на типоморфологии керамического материала, археологический памятник Ярым Тепе II был датирован советскими археологами Халафским периодом позднего Неолита, с присутствием в верхней части разреза керамики переходного, от Халафской к Убейдской культуре, периода [Мунчаев и Мерперт, 1981; Akkermans and Schwartz, 2003; Bernbeck and

Nieuwenhuysе, 2013]. Однако позднее некоторыми авторами было отмечено, что в разрезе отсутствуют отложения раннего Халафского периода [Bernbeck and Nieuwenhuysе, 2013]. Для того, чтобы проверить данное утверждение, нами был проведен радиоуглеродный анализ образцов костей, отобранных из разреза. Датирование было произведено в лаборатории Beta Analytics (Майами). Было отобрано по одному образцу кости из трех стратиграфических уровней разреза. Полученные радиоуглеродные возраста были калиброваны при помощи программы OxCal с использованием калибровочной базы данных INTCAL13 [Reimer et al., 2013].

Для представления кривой вариаций напряженности геомагнитного поля, полученной по разрезу отложений памятника Ярым Тепе II, как функции времени, нами была построена временная модель по технике «бутстрэп» – статистический метод распределения вероятностей путем генерации выборок методом Монте-Карло. В основе данной процедуры лежат несколько точек привязки из археологического разреза. Таковыми являются полученные нами три радиоуглеродных возраста, а также три границы Халафских подразделений, с соответствующими им стратиграфическими уровнями. Для построения временной модели части разреза, датированной переходным Халаф-Убейдским периодом, мы использовали технику грубой аппроксимации значений на основе постоянной скорости накопления культурных отложений, рассчитанной для нижней части разреза (0.94 см/год).

Для памятника Ярым Тепе I нами так же был проведен радиоуглеродный анализ трех образцов костей, отобранных из различных стратиграфических уровней. Полученные радиоуглеродные возраста подтвердили, что время существования памятника относится к концу 7-го – началу 6-го тысячелетия до н.э. (~6200 – 5900 лет до н.э.). Так же, как и в случае датирования памятника Ярым Тепе II, для представления новых данных археонапряженности, полу-

ченных по Ярым Тепе I, как функции времени, нами была построена временная модель, основанная на технике «бутстрэп» - статистическом методе на основе модели Монте-Карло.

В настоящее время мы ожидаем получения еще двух радиоуглеродных возрастов для уточнения датирования разреза, а также для улучшения нашей временной модели. Результаты анализа ожидаются в январе 2018 года.

Обсуждение результатов

Мы провели сравнение новых данных археонапряженности, полученных нами при изучении Ярым Тепе I и II, с двумя основными наборами данных, доступных для шестого тысячелетия до н.э., полученных при изучении археологических объектов Сирии [Gallet et al., 2015] и относительно близко расположенного региона Болгарии [Kovacheva et al., 2014].

Сравнение данных Северной Месопотамии с данными, полученными по Болгарии [Kovacheva et al., 2014] подтверждает наличие узкого пика напряженности в районе 5500 лет до н.э., а также падение значений напряженности в интервале ~5600 – 5400 лет до н.э. (Рис. 4.4). Второй пик напряженности, в районе 5800 лет до н.э., выявленный в Болгарской археомагнитной записи, не может быть подтвержден в настоящее время за неимением данных археонапряженности для данного временного интервала. Сравнение археомагнитных кривых Северной Месопотамии и Болгарии в промежутке, отнесенном к переходному Халаф-Убейдскому периоду, в настоящее время также весьма проблематично.

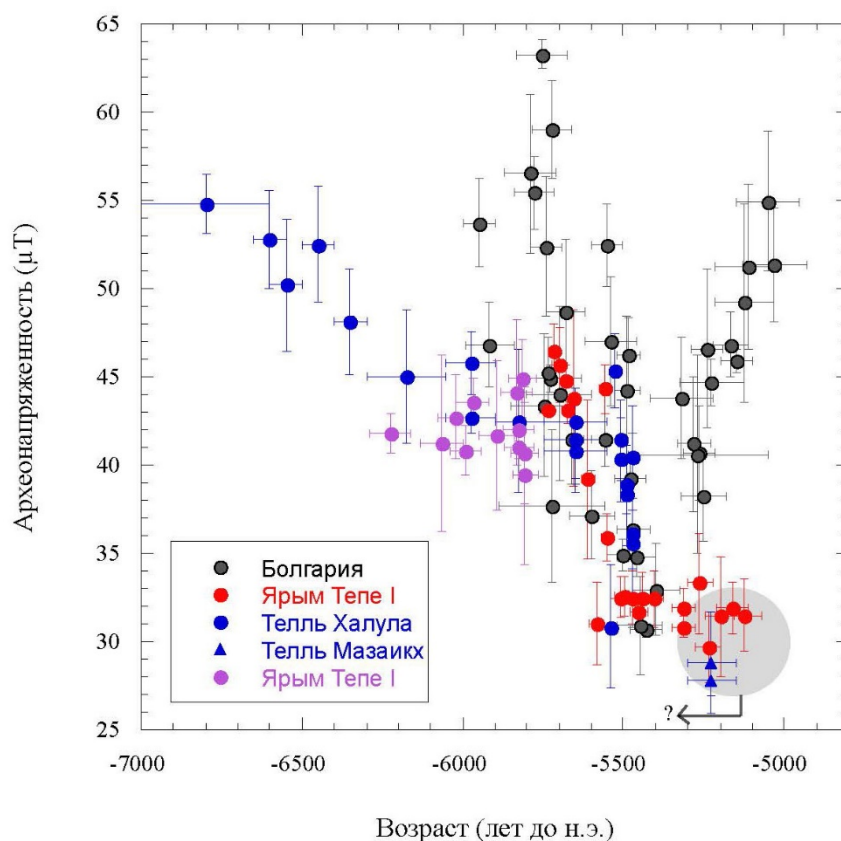


Рис. 4.4. Сравнение данных археонапряженности, полученными по Ярм Тепе I и II с данными, полученными по памятникам Болгарии и Сирии.

В Болгарской археомагнитной записи наблюдается явный тренд к увеличению значений археонапряженности на протяжении указанного периода вплоть до $\sim 50 \mu\text{T}$, в то время как в археомагнитной записи Северной Месопотамии значения напряженности остаются на уровне $\sim 30\text{--}33 \mu\text{T}$. Однако, важно заметить, что абсолютное датирование данного археологического периода в настоящее время весьма спорно, и последний не имеет четких временных рамок (см. дискуссию в [Campbell and Fletcher, 2010]). Так, если граница позднего Халафа и переходного Халаф-Убейдского периода будет датирована примерно на столетие раньше (в районе 5400 лет до н.э.), то согласие данных археонапряженности Верхней Месопотамии и Болгарии будет идеальным. Такой вариант в будущем может быть подтвержден новыми данными, полученными

по Теллю Бегум, расположенному в Иракском Курдистане, в настоящий момент исследуемому археологической экспедицией под руководством О. Nieuwenhuysе.

Результаты археонапряженности, полученные по Ярым Тепе I, показали, что на протяжении конца седьмого – начала шестого тысячелетия до н.э. не было выявлено значительных вариаций напряженности геомагнитного поля. Значения археонапряженности составляли в среднем $42.8 \mu\text{T}$ (с минимальным значением $39.4 \mu\text{T}$ и максимальным значением $46.35 \mu\text{T}$). Также не выявлено тренда к уменьшению или увеличению напряженности по разрезу. Сравнение полученных данных по Ярым Тепе I с данными по Теллю Халула в том же временном интервале, показало, что средние значения напряженности хорошо согласуются между собой, так же, как и отсутствие значительных флуктуаций напряженности геомагнитного поля.

Мы рассчитали интенсивность вариаций напряженности на протяжении шестого тысячелетия до н.э. во время резкого снижения значений, а также во время пика напряженности в районе 5500 лет до н.э. Нами были получены следующие значения: во время падения напряженности в интервале $\sim 5600 - 5500$ лет до н.э. интенсивность вариаций составляла $\sim 0.14 \mu\text{T}/\text{год}$; во время пика напряженности в районе ~ 5500 – примерно $0.23 \mu\text{T}/\text{год}$ и $0.19 \mu\text{T}/\text{год}$ для восходящей и нисходящей ветви археомагнитной кривой, соответственно. Таким образом, общая интенсивность вариаций на протяжении указанного периода составляла $\sim 0.15 - 0.25 \mu\text{T}/\text{год}$, что несколько выше таковой, рассчитанной для современного магнитного поля [Livermore et al., 2014]. Данные значения сопоставимы со значениями, полученными для более молодых периодов на территории Западной Европы: около 700 лет до н.э. [Hervé et al., 2017] и в течение 10-го века н.э. [Genevey et al., 2013, 2016]. При этом, эти значения значительно ниже таковых, рассчитанных для периодов геомагнитных «спайков» [Ben-Yosef et al., 2009; Shaar et al., 2011; 2016] и археомагнитных «джерков» [Gallet et al., 2003; 2014].

Выводы

Выполненные нами исследования показали высокую перспективность многослойных археологических памятников, как для археологических, так и для археомагнитных исследований.

Наши результаты, вместе с данными, полученными ранее при исследовании археологических памятников Сирии и Болгарии, показывают, что шестое тысячелетие до н.э. было периодом весьма значительных и быстрых вариаций напряженности геомагнитного поля. Данный интервал является одним из наиболее интересных для получения новых данных археонапряженности в масштабах десятков и первых сотен лет.

С использованием археомагнитных определений, выполненных в рамках настоящего исследования, были получены новые важные ограничения на возраст исследуемых культурных слоев, которые затем были подтверждены данными изотопного анализа. Этот пример еще раз показывает, что археомагнетизм может рассматриваться как важный независимый метод датирования археологических памятников.

Задача 1.5. Построение сводной региональной кривой вариаций направлений и напряженности геомагнитного поля на территории Средней Азии и Среднего Востока на протяжении последних ~5000 лет.

Цели и задачи исследования, обоснование выбора объекта

Основной целью настоящего исследования является изучение эволюции геомагнитного поля на территории Ближнего Востока и Средней Азии на протяжении последних 5000 лет, при этом наибольший интерес представляют эпизоды быстрых (десятки – первые сотни лет) вариаций напряженности и направлений геомагнитного поля. Такие эпизоды широко обсуждаются в палеомагнитном и геомагнитном мировом научном сообществе. Основная проблема при их изучении состоит в том, что надежно зафиксировать и охарактеризовать природу данных вариаций в геомагнитной летописи прошедших эпох весьма сложно. Для достижения этой цели необходимо построение детальных региональных схем вариаций магнитного поля, на которых короткопериодические геомагнитные события будут фиксироваться с большой точностью. При этом, временное разрешение таких схем имеет критическое значение, в связи с коротким временем существования самих событий.

В данном контексте, такырные отложения представляют большой интерес для соответствующих исследований, поскольку, в силу наличия в них годовой ленточной слоистости, могут быть непосредственно привязаны к шкале времени.

Существование прогибов, заполненных тонкослоистыми формациями такырных озерных ленточных отложений, на территории Средней Азии делает этот регион крайне привлекательным для проведения подобного рода исследований.

Особый научный интерес данное исследование представляет в связи с практически полным отсутствием данных о вариациях направлений геомагнитного поля на территории Средней Азии на протяжении древних периодов. В

свою очередь, получение таких данных позволит значительно улучшить глобальные геомагнитные модели.

Для достижения целей исследования необходимо решить следующие задачи:

1. Организовать и провести полевые работы в районе Данатинского коридора Западного Туркменистана с целью отбора образцов пород из разреза такырных отложений.
2. Подготовка и проведение палеомагнитного анализа образцов
3. Проведение дополнительных анализов на подтверждение проведенного ранее геологического расчленения и датирования разреза, основанного на варвохронологии.

Такырные отложения содержат палеоклиматическую запись, которая исключительно важна для изучения истории климатических изменений в этом регионе и их прогноза на будущее. Восстановление и расшифровка этой записи с использованием петромагнитных методов составляет содержание дополнительной, четвертой задачи, проводимых исследований.

Задача 1 была выполнена нами в ходе работ по Проекту в 2016 г. Задачи 2, 3 решались на протяжении 2017 г.

Объект, методика исследования

Объект исследования находится в районе Данатинского коридора между хребтами Кюрендаг и Малый Балхан и расположен в пределах развивающегося скомпенсированного прогиба, заполненного тонкослоистыми алевроитами с примесями песков и более рыхлых пород типа суглинков и супесей (Рис. 5.1.). Тонкослоистая структура отложений (Рис. 5.2.) обусловлена характером осадконакопления: в сезон дождей обломочный материал сносится с хребтов, заполняя собой площадь такыра с образованием плоскодонного мелкого озера. В период засухи происходит выпаривание влаги и выпадение

осадка с последующей литификацией и образованием слоя мощностью ~1 мм. Ниже слоя такырных отложений (начиная с глубины ~520 см) залегает мощная толща суглинков иного генезиса. Время накопления такырной части разреза ~5000 лет, что позволяет проследить непрерывную детальную палеомагнитную летопись на протяжении этого времени.

В разрезе четко выделяются слои более грубой текстуры, обогащенные различными минеральными примесями, отвечающие различным событиям-индикаторам, происходившим на данной территории (например, повышение уровня Каспийского моря, увеличение уровня осадков, повышенное увлажнение почвы и т.п.). Фиксирование и детальное изучение таких событий весьма важно для восстановления палеоклиматической и палеогеографической истории развития данной территории в связи с высокой чувствительностью такого типа озерных отложений к малейшему изменению гидрогеологического режима и климатических обстановок.

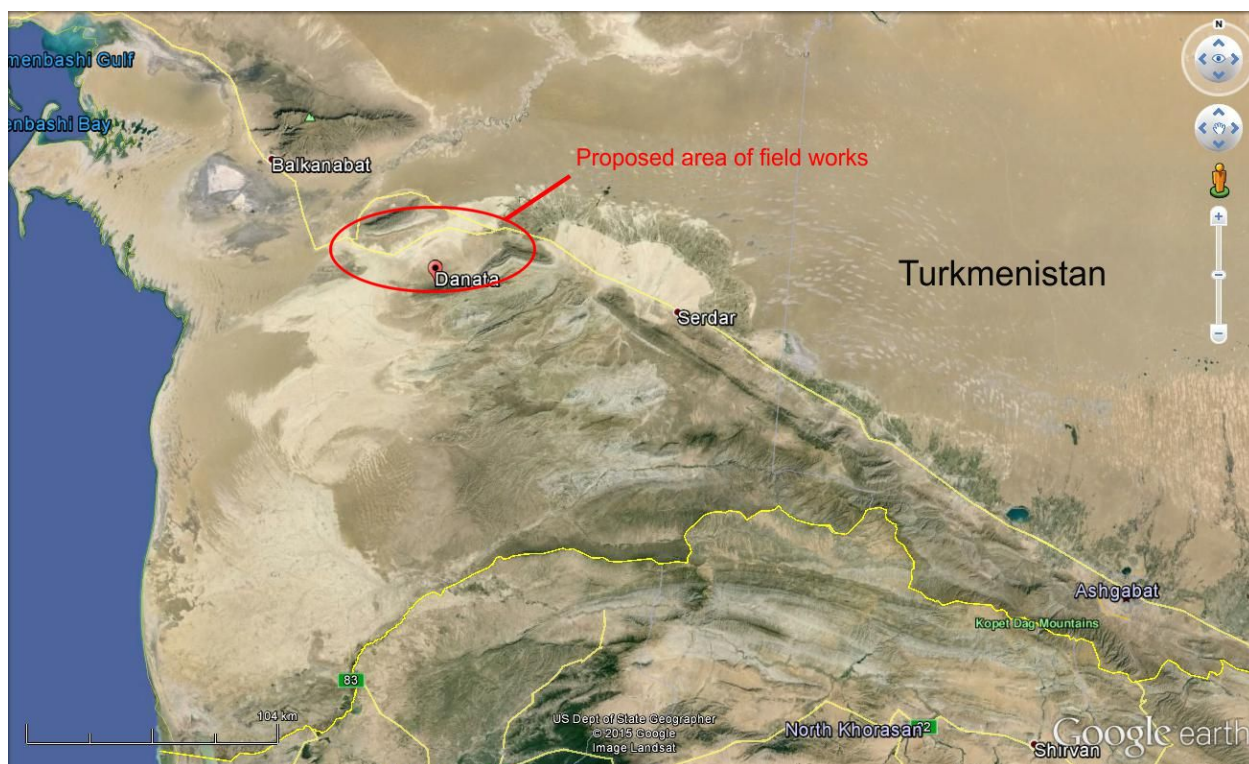


Рис. 5.1. Географическое положение объекта исследования.



Рис. 5.2. Годичные слои – варвы – в разрезе такырных отложений.

Во время полевых работ 2016 г. при помощи бульдозера было заложено три траншеи (Рис. 5.3.), 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. Перед началом отбора образцов было проведено детальное литологическое и стратиграфическое описание разреза отложений, выявлены маркирующие горизонты, отвечающие климатическим событиям, происходившим в данном регионе в период накопления отложений изучаемого объекта (на протяжении последних ~5000 лет). На палеомагнитный анализ всего было отобрано 96 образцов, представляющих из себя блоки пород (~2000 см³ каждый), общим весом около 350 кг. (Рис. 5.4.).

Было отобрано 25 образцов из первой траншеи (Рис. 5.3.) и 7 образцов из второй на проведение Оптически Стимулированной Люминесценции

(OSL). Данный анализ позволяет определить время последнего пребывания конкретного зерна на свету (т.е. время погребения зерна; [Buylaert et al., 2012]). Проведение такого анализа позволяет получить датировки слоев, из которых отобраны пробы, с высокой точностью (погрешность для эоловых, лессовых и лимнических отложений составляет менее 5%). Отбор проб производился по простиранию слоев каждые 20 см (каждая проба ~500-700 грамм). Кроме того, из тех же слоев отбирались пробы на полную радиоактивность.



Рис. 5.3. Раскопы, заложенные для изучения разреза такырных отложений и отбора.

В 2016-2017 гг. в ходе подготовки к палеомагнитному анализу блоки пород, отобранные во время полевых работ, были распилены на тонкие слои, мощностью 2 см в соответствии со стратиграфическими уровнями разреза. Далее, из каждого слоя были подготовлены образцы кубической формы, объемом $\sim$

8см³. Общее число образцов для палеомагнитного анализа составляет порядка 1200 кубиков из одной траншеи. Измерение образцов проводится на оборудовании палеомагнитной лаборатории Института Физики Земли Парижа - магнитометре 2GV. Терморазмагничивание производится с помощью печи, позволяющей поддерживать гомогенную высокую температуру в процессе размагничивания (в данном случае до ~680° C).

Датирование образцов проводилось в 2017 г. в лаборатории Оптически Стимулированной Люминесценции (OSL) в Университете Аархус (Aarhus University, г. Рисо, Дания). Было проведено исследование части осадка на дозу радиации, а также скорости ее накопления при помощи определение общего радиоактивного фона пород.

Петромагнитные анализы проводились на оборудовании лаборатории Института физики Земли, Палеомагнитной лаборатории Казанского Федерального Университета, а также палеомагнитной лаборатории Института Физики Земли Парижа. Данные исследования были проведены для образцов такырных отложений, отобранных из первой траншеи с интервалом 2 см вдоль разреза.

Палинологические исследования в настоящее время проводятся в лаборатории CEREGE Technopôle de l'Arbois-Méditerranée, BP80, 13545 Aix-en-Provence, France.

Рентгенофлуоресцентный анализ в настоящее время проводится для серии образцов лаборатории Географического Института Бременского Университета. Часть результатов этих анализов уже получена, другая часть будет доступна в 2018 г.



Рис. 5.4. Пробы, отобранные из разреза такырных отложений, предназначенные для проведения различных анализов.

Гранулометрический анализ в настоящее время проводится в лаборатории Географического факультета Московского Государственного Университета.

Результаты

Магнитные чистки являются обязательной лабораторной процедурой, необходимой для выделения и расчета древних компонент намагниченности. Для выбора оптимальных режимов чисток, а также для правильной интерпретации их результатов часто необходимо выполнить определенный объем магнитоминералогических исследований. Эти исследования в массовом порядке проводились нами в 2017 г. на коллекции, отобранной из такырных отложений. Анализ полученных результатов показывает, что главным минералом-носителем намагниченности в изученных обнажениях является магнетит, в меньшей степени – гематит, в большом числе образцов обнаружены также следы окислов железа.

В ходе проведенных палеомагнитных лабораторных исследований нами была выполнена детальная температурная магнитная чистка пилотной коллекции образцов, по одному образцу из каждого стратиграфического уровня. По результатам магнитной чистки, начиная с прогревов до 400-450°С удастся выделить характеристическую компоненту намагниченности, отражающую, вероятно, направление древнего магнитного поля во время накопления пород соответствующего стратиграфического уровня. В то же время, сравнение направлений характеристической компоненты намагниченности для соседних стратиграфических уровней указывает на существование достаточно большого статистического разброса, для преодоления влияния которого и для повышения точности реконструкции палеонаправлений, очевидно, необходимо изучить по несколько образцов с каждого стратиграфического уровня. Эти работы планируется выполнить в 2018 г.

Параллельно температурной чистке проводилась чистка дублей образцов переменным магнитным полем. Характеристическая (в смысле [Zijderveld, 1967]) намагниченность выделяется в интервале приложенных полей 150-300 эрстед, причем соответствующая компонента не всегда является конечной, что, вероятно, связано с присутствием в породах гематита и окислов железа. В целом результаты чистки переменным магнитным полем и результаты температурной чистки неплохо согласуются друг с другом, тем не менее, чистка переменным магнитным полем по несколько дублей с одного стратиграфического уровня также представляется целесообразной. Эти работы будут проведены в 2018 г.

На настоящий момент уже получены 4 датировки методом OSL из двух изучаемых траншей. Одна из проб, вероятно, была испорчена во время подготовки к проведению анализа, т.к. результат датирования резко отличается как от остальных полученных возрастов, так и от возрастов, установленных ранее на основании варвохронологии. Новые результаты подтвердили правильность предварительной корреляции двух разрезов на основании подсчета годовых варв. Кроме того, полученные датировки удовлетворяют рассчитанной на основании подсчета слоев скорости осадконакопления, которая варьирует в интервале $\sim 0.8 - 1.5$ мм в год.

Датировки, полученные методом OSL, несколько (но не критически) отличаются от таковых, установленными на основании варвохронологии. Однако, учитывая тот факт, что метод оптически стимулированной люминесценции для голоценовых отложений находится на стадии разработки и не имеет в настоящее время четких критериев оценки погрешностей результатов, а также то, что абсолютное датирование разреза не было проведено ранее, полученные нами датировки могут быть учтены при построении кумулятивной кривой вариаций геомагнитного поля. В 2018 году планируется провести измерение дополнительных проб методом OSL.

В течение 2017 г. нами были проведены подробные петромагнитные исследования. Выполнены измерения различных видов магнитной восприимчивости (порядка 200 образцов), получены кривые нормальной и естественной остаточной намагниченности (для 200 образцов), выполнен терромагнитный анализ десяти образцов с равномерным шагом вдоль разреза. Петромагнитные данные используются для идентификации магнитных минералов, вариативность полученных параметров вдоль разреза позволяет судить об условиях формирования окружающей среды времени образования исследуемого объекта, в частности климатических условиях, что в дальнейшем и планируется. В результате петромагнитных исследований на данный момент сделаны выводы о наличии двух магнитных минералов в исследуемых образцах, предположительно магнетита и гематита. Полученные кривые вариаций петромагнитных параметров имеют достаточно контрастный вид, что в дальнейшем при получении результатов немагнитных исследований позволит произвести качественную интерпретацию полученных данных для оценки изменений обстановки окружающей среды во время образования исследуемой толщи (Рис. 5.5).

Для пробного блока такырных отложений на базе оборудования КФУ (г. Казань) сделана рентгенотомография с целью выявления слоистости по плотности вещества. К сожалению, ввиду слабых плотностных различий, возможно выделение только достаточно крупных слоев блока, мелкую слоистость обнаружить не удалось.

Для пробного блока такырных отложений на базе оборудования КФУ (г. Казань) проведен рентгенофлюоресцентный анализ, в результате которого был получен полный элементный состав исследуемого блока, что дало нам представление о химическом составе и распределение элементов вдоль блока.

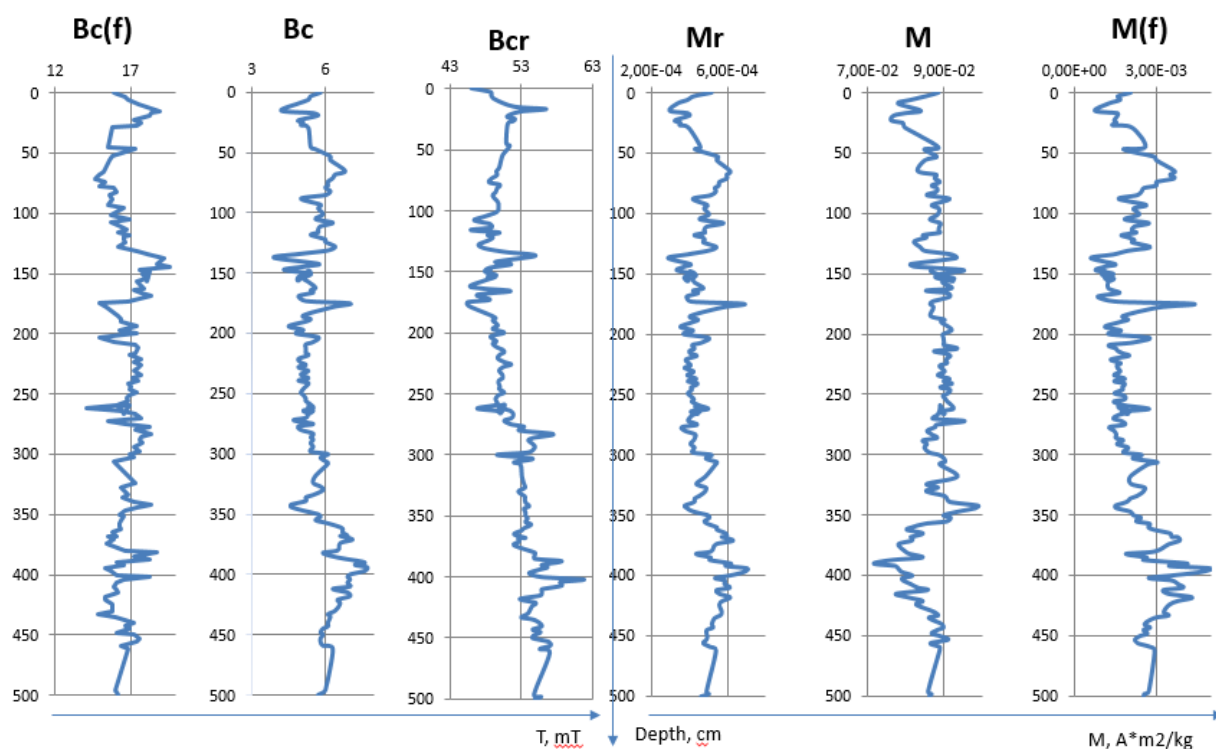


Рис.5.5. Кривые, построенные для различных петромагнитных параметров вдоль разреза такырных отложений.

В 2018 г. нами планируется изучение вариаций магнитной минералогии, гранулометрии, концентрации магнитных минералов, палинологических данных; получение дополнительных датировок в лаборатории Университета г. Аархус (Aarhus University, г. Рисо, Дания) новой серии такырных образцов с использованием метода оптически стимулированной люминесценции; а также сопоставление этих данных с полученными петромагнитными и палеомагнитными данными с целью интерпретации в контексте палеоклимата.

Выводы

Полученные в 2017 г. палеомагнитные данные, подтверждают, что такырные отложения являются перспективным объектов для изучения вариаций геомагнитного поля на протяжении последних тысячелетий. Массовая палеомагнитная обработка отобранных коллекций, с изучением по несколько дуб-

лей с каждого стратиграфического уровня и с использованием как температурной чистки, так и чистки переменным магнитным полем, позволит получить к концу 2018 г. детальную запись вариаций геомагнитного поля в Средней Азии на протяжении последних нескольких тысячелетий. Для этого в 2017 г. сделан важный задел, как в плане палео- и петромагнитного изучения коллекций, так и в плане их датирования.

Датирование такырных отложений, основанное на суперпозиции годовых варв, подтверждается предварительными данными, полученными при OSL датировании. Голоценовые отложения на территории Средней Азии представляют собой потенциально перспективный объект для усовершенствования протокола OSL, разработанного и успешно применяемого для датирования более древних отложений.

В 2017 г. начаты работы по палинологическому, гранулометрическому и другим видам дополнительных анализов, результаты которых будут получены в 2018 г. Сопоставление их с полученными петромагнитными данными представляется весьма многообещающим для реконструкции палеоклиматических обстановок и палеогеографии региона.

1.6. Изучение напряженности геомагнитного поля на территории Центральной России в интервале XVI век - начало XIX века.

Актуальность, цели и задачи

Предложенные к настоящему времени модели эволюции геомагнитного поля в течение последних столетий предполагают различный характер поведения поля во временном интервале с XVI по XIX в. Для определения истинного поведения геомагнитного поля в этот период и тестирования, выбора моделей геомагнитного поля наиболее точно описывающих эволюцию геомагнитного поля в этот период, необходимо получение новых данных. Целью работ, выполнявшихся нами в 2017 г., было получение таких данных. При этом, решались следующие основные задачи: 1) лабораторное изучение археологических коллекций, точно датированных между 1764 и 1838 годами для определения характера изменений геомагнитного поля в Центральной России в этот временной период и 2) сравнение полученных результатов с региональными и глобальными моделями эволюции геомагнитного поля.

Краткое описание объектов и методов

В 2017 году проведен комплекс археомагнитных исследований коллекции обожженных кирпичей, отобранных в Ярославской области в 2015 году. Коллекция представлена пятью разновозрастными группами фрагментов древних кирпичей, точно датированных согласно историческим свидетельствам между 1764 г. (памятник Никольская церковь) и 1838 годами (памятник Георгиевский собор).

На Ярославской коллекции был выполнен комплекс петромагнитных методов для изучения магнитных свойств материала фрагментов: терромагнитный анализ намагниченности насыщения ($M_s(T)$) и магнитной восприимчивости ($K(T)$); измерение изотермической остаточной намагниченности, сня-

тие гистерезисных петель и определение гистерезисных параметров – намагниченности насыщения, остаточной намагниченности насыщения, коэрцитивной силы, остаточной коэрцитивной силы. В дополнение, были проведены эксперименты Lowrie [Lowrie, 1990], позволяющий разделять магнитожесткие и магнитомягкие минералы по температурам деблокирования.

В настоящей работе эксперименты по определению напряженности проведены по протоколу «Триакс» [Le Goff, Gallet, 2004], являющимся автоматизированной версией метода Телье. Протокол «Триакс» был специально разработан для определения напряженности магнитного поля с помощью трехосного вибрационного термомагнитометра, созданного на базе Парижского института физики Земли [Le Goff, Gallet, 2004].

Описание результатов

Исследование петромагнитных свойств

Предварительно, все фрагменты кирпичей коллекции были исследованы на предмет стабильности их магнитных свойств к нагревам до высоких температур для оценки перспективности получения качественных определений археонапряженности. Магнитная восприимчивость от температуры ($K(T)$) была измерена на порошкообразных образцах до температур 520 °C (Рис. 6.1.).

Критерием отбраковки образцов, непригодных для дальнейших исследований считалось расхождение кривых нагрева и охлаждения более чем на 10 %. По результатам термомагнитного анализа было отсеяно 3 образца из 55 исследованных.

Все последующие магнито-минералогические исследования относятся к образцам, по которым получены значения археонапряженности. Термомагнитный анализ фрагментов кирпичей показал наличие в образцах магнетита и/или минералов титаномagnetитового ряда с температурами Кюри 540 – 580°C (Рис. 6.1.), минерала с низкими температурами Кюри (по кривым $M_s(T)$) и, в некоторых случаях, гематита.

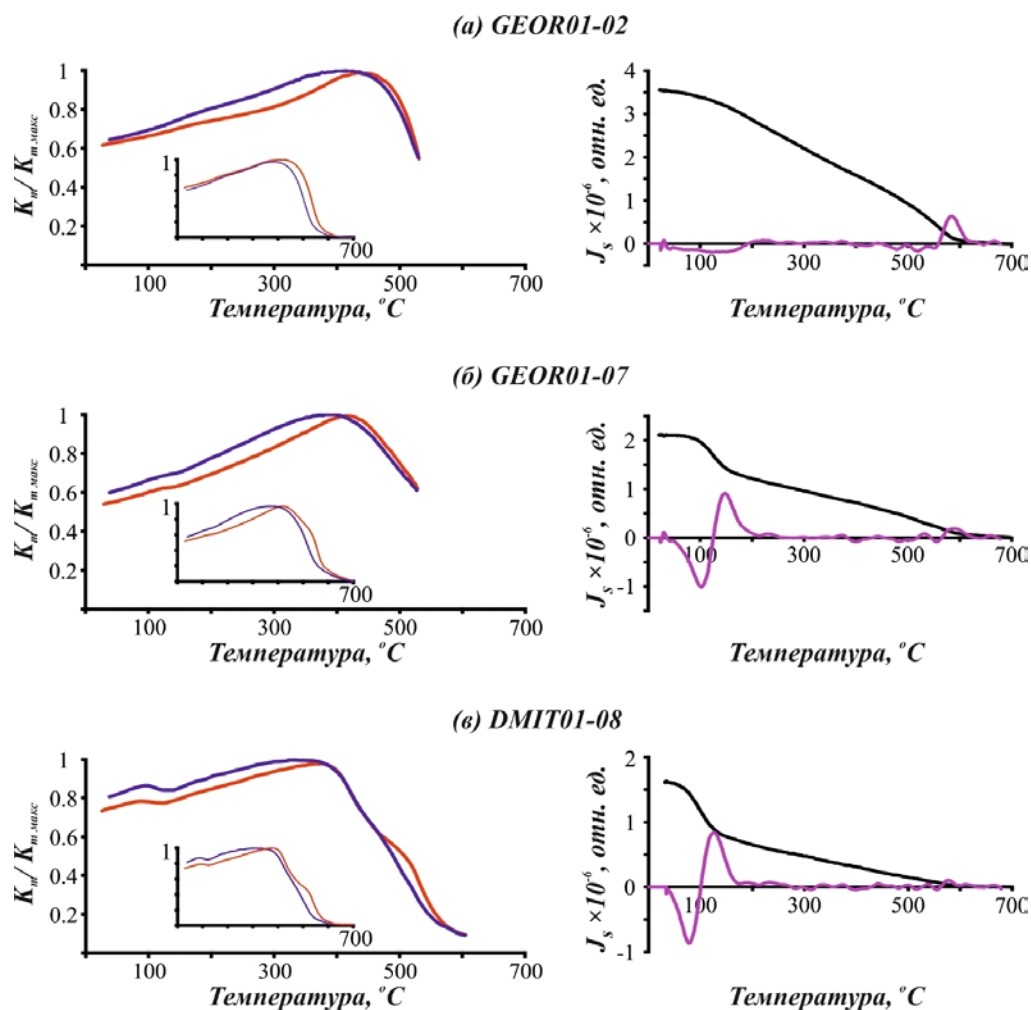


Рис. 6.1. Результаты терромагнитного анализа слева- $K(T)$ при нагреве (красная кривая) и охлаждении (синяя кривая); справа - $M_s(T)$, при нагреве (черная кривая) и вторая производная от $M_s(T)$ (розовая кривая) для фрагментов трех различных групп. (а) – для фрагмента GEOR01-02, I группа, (б) – GEOR01-07, II группа, (в) – DMIT01-08, III группа.

По результатам эксперимента Lowrie все фрагменты можно разделить на три группы. К первой группе относятся фрагменты, где основным магнитным минералом является низкокоэрцитивный минерал с температурами деблокирования $\sim 540^\circ\text{C}$. Вторая группа представлена фрагментами, где наряду с низкокоэрцитивным минералом с температурами деблокирования $540 - 580^\circ\text{C}$

присутствует высококоэрцитивный минерал с низкими температурами деблокирования 150 – 200 °C (HCSLT, согласно [McIntosh et al., 2011]). Отметим, что HCSLT минерал определить не удалось, его свойствами являются высокая коэрцитивность, стабильность к нагревам и низкие температуры деблокирования и T_k . В недавней работе [Lopez-Sánchez et al., 2017] высококоэрцитивный минерал характерный для археологических фрагментов был определен как ϵ - Fe_2O_3 . Возможно, этот минерал выступает высококоэрцитивным минералом с низкими температурами деблокирования и в Ярославской коллекции.

По результатам петромагнитных исследований можно сделать следующие выводы: 1. Магнитные минералы фрагментов Ярославской коллекции преимущественно стабильны к нагревам до высоких температур и фрагменты перспективны для экспериментов по определению напряженности. 2. Температуры деблокирования HCSLT минерала близки к начальной температуре интервала определения напряженности, следовательно, его наличие не оказывает существенного влияния на результаты определения напряженности. 3. По фрагментам, относящимся к третьей группе, ранее [Salnaia et al., 2017] проводились эксперименты по созданию на них псевдоестественной остаточной намагниченности и последующим измерениям по протоколу «Триакс». Результаты показали ошибку в определении палеополя в пределах погрешности измерений. Следовательно, присутствие во фрагментах гематита, не оказывает существенного влияния на результат определения напряженности геомагнитного поля.

Определение напряженности геомагнитного поля.

Археомагнитные исследования напряженности геомагнитного поля ($H_{др}$) в температурном интервале 150 – 490 °C. По коллекции Ярославской области качественные определения $H_{др}$ получены по 98 образцам из 24 фрагментов, представляющих пять разновозрастных групп. Остальные результаты были отсеяны по критериям протокола [Gallet, Le Goff, 2006], а именно: из-за

вогнутости кривых напряженности от температуры, различия среднего на уровне фрагмента и среднего значения для археомагнитного сайта более 5% и вторичной остаточной намагниченности.

Средние значения на уровне фрагментов были вычислены по результатам исследования трех – пяти образцов из одного фрагмента. В свою очередь средние значения на уровне группы фрагментов были определены по трем (группа NIK01) – семи (группа GEOR01) фрагментам.

Для оценки эффекта скорости охлаждения определения напряженности проводились с использованием различных скоростей при создании лабораторной термоостаточной намагниченности (ТОН) - 2 и 25 °C/мин. Этот способ не позволяет проводить корректировку результатов определений за эффект скорости охлаждения, однако, дает информацию о влиянии этого эффекта на конечный результат. Средние значения, полученные из экспериментов со скоростью создания лабораторной ТОН - 2 и 25 °C/мин близки по значению, разброс таких определений составляет 0.3 – 1.8 %. Разброс определений на уровне фрагментов варьирует от 0.1 до 1.7 мкТл, что в процентном соотношении составляет от 0.3 до 3.7 % и соответствует допустимым 5 %.

Средние значения $H_{др}$ по Ярославской коллекции получены по пяти разновозрастным памятникам, точно датированным между 1764 и 1838 годами. Результаты исследований показывают весьма близкие определения напряженности магнитного поля в пределах от 46.9 ± 2.3 до 48.5 ± 1.4 мкТл, что говорит в пользу отсутствия существенных изменений напряженности геомагнитного поля в этот период.

Обсуждение результатов

Сравнительный анализ полученных в данной работе определений $H_{др}$ с региональной эталонной кривой по Западной Европе показал соответствие

между ними в рамках погрешностей, предварительно все данные были приведены к широте В. Новгорода через формулу виртуального аксиального дипольного момента [Merril et al., 1996], (Рис. 6.2.). Хорошая согласованность между полученными данными по Центральной России и региональной эталонной кривой по Западной Европе может свидетельствовать об отсутствии существенного вклада недипольных источников в главное геомагнитное поле на территории Западной Евразии.

Таблица 6.1. Определения напряженности геомагнитного поля по Центральной России на уровне групп фрагментов.

Группа фрагментов	φ°, с.ш.	λ°, в.д.	Археологический/Архитектурный памятник	Датировка, г. н.э.	N(n)	$H_{дрер} \pm \sigma H_{др}$ (мкТл)
BGA01	58.49	31.30	Церковь Благовещения на Городище	1103	5 (21)	66.1±1.9
GYU01	58.49	31.28	Георгиевский собор Юрьева монастыря	1119	3 (11)	61.1±1.4
PP01	58.51	31.26	Церковь Петра и Павла на Сильнице	1185 - 1192	6 (25)	61.4±1.4
SN01	58.50	31.31	Спасо-Преображенский храм на Нередицком холме	1198	4 (17)	61.2±2.6
SH01	58.48	31.30	Покровская церковь Шилова монастыря	1310	5 (20)	60.1±1.4
DM02	58.56	31.30	Воскресенский Деревяницкий монастырь	1335	5 (21)	58.3±2.0
AS01	58.50	31.33	Церковь Андрея Юродивого на Ситке	1371	4 (20)	58.3±2.3
VS01	58.58	31.23	Владимирский собор Сыркова монастыря	1548 - 1554	3 (13)	58.8±0.7

NJ01	55.92	36.85	Новоиерусалимский монастырь	1680-1690	5(30)	50.2±2.0
DM03	58.56	31.30	Воскресенский Деревяницкий монастырь	1695 – 1697	5(17)	48.7±1.6
NJ02	55.92	36.85	Новоиерусалимский монастырь	1710-1720	4(22)	47.7±1.8
NIK01	57.90	38.30	Церковь Николая Чудотворца	1764	3(12)	47.4±0.6
NEK01	57.90	38.00	Церковь Святой Троицы Живоначальной	1790	5(19)	46.9±2.3
VER01	58.10	38.20	Церковь Покрова Пресвятой Богородицы	1792 - 1793	4(18)	48.5±1.4
DMIT01	58.00	38.00	Церковь Воздвижения Креста Господня	1808	5(19)	47.8±1.3
GEOR01	57.30	38.90	Церковь Георгия Победоносца	1838	7(30)	47.3±1.0

Примечание к таблице: Группа фрагментов - краткое название отобранных групп фрагментов; φ , с.ш., λ , в.д. – координаты отбора групп фрагментов; Археологический/архитектурный памятник - полное наименование памятников; Датировка, г. н.э.; $N(n)$ – количество фрагментов (образцов); $H_{др\ ср} \pm \sigma H_{др}$ (мкТл) - среднее значение напряженности геомагнитного поля на уровне группы фрагментов в мкТл $\pm$ стандартное отклонение в мкТл

Результаты сравнительного анализа полученных археомагнитных данных с предполагаемыми значениями геомагнитного поля, рассчитанных из глобальных моделей поля [Jackson, 2000; Gubbins et al., 2006; Finlay, 2008; Licht et al., 2013; Pavon-Carrasco et al., 2014; Nilsson et al., 2014] приведены на Рис. 6.2.

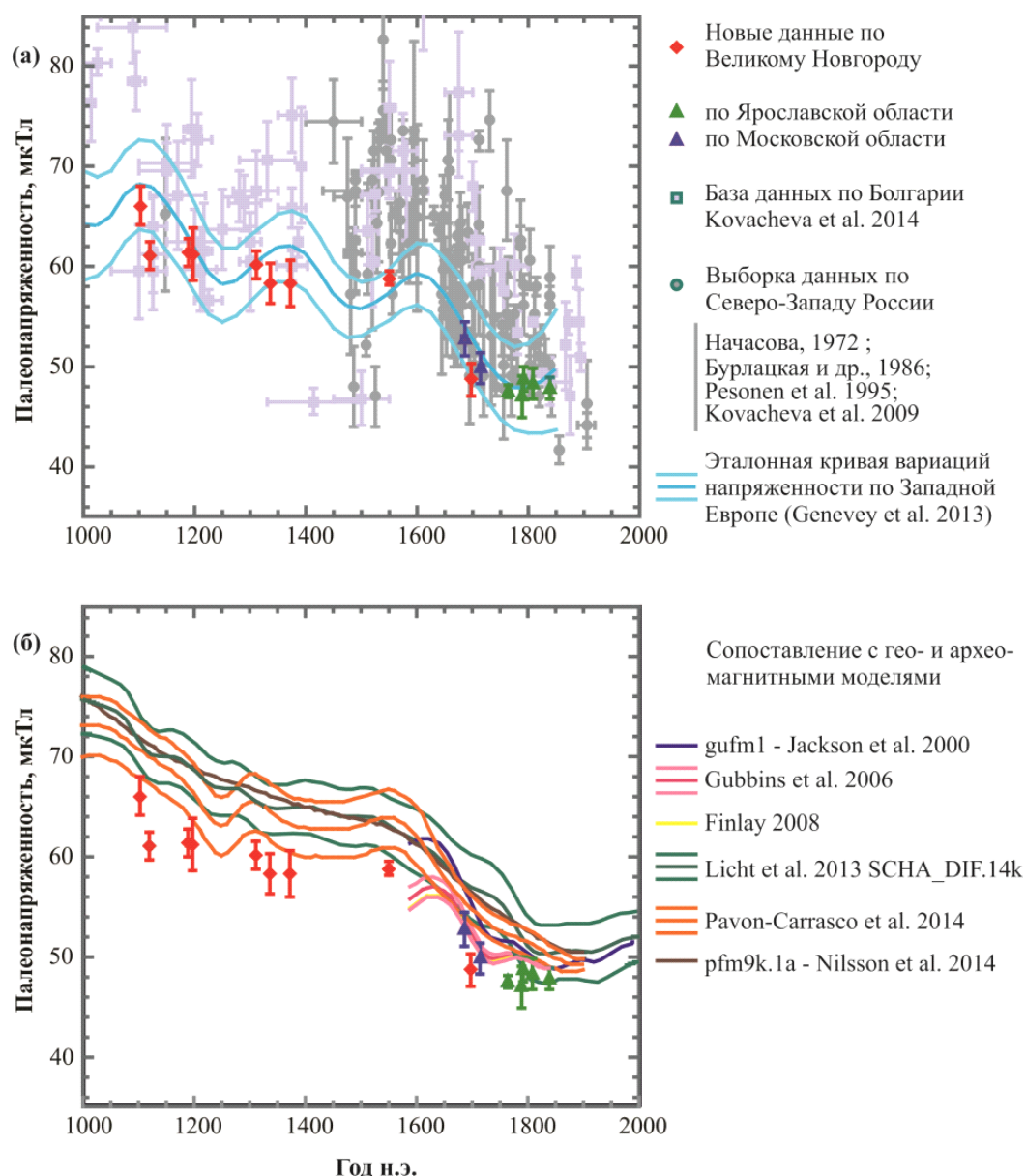


Рис. 6.2. Сопоставление полученных в ходе работы определений $H_{\text{др}}$ с (а) выборкой из археомагнитной базы данных по региону и эталонной кривой по Западной Европе [Genevey et al., 2013] и (б) с гео- и археомагнитными моделями поля.

Расчетная кривая вековых вариаций геомагнитного [Nilsson et al., 2014] демонстрирует более плавное изменение напряженности, чем другие, что вероятно связано с использованием данных по осадочным и вулканическим породам наряду с определениями по археологическим объектам (см. обсуждение в [Licht et al., 2013]). Показано, что определения $H_{\text{др}}$, полученные в ходе работы,

по Новгородской, Ярославской и Московской коллекциям имеют пониженные величины в сравнении с рассчитанными из моделей.

Значения $H_{др}$, полученные по группам фрагментов, датированных началом XVIII – первой третью XIX веков показывают линейную эволюцию напряженности геомагнитного поля, что соответствует характеру поведения геомагнитного поля, предсказанную моделями [Licht et al., 2013; Gubbins et al., 2006; Finlay, 2008] и не отвечает моделям, предложенным в работах [Pavon-Carrasco et al., 2014; Nilsson et al., 2014], которые предусматривают линейный спад дипольного момента с XVI века по 1840 г.

Выводы

За последние четыре года выполнены археомагнитные исследования по археологическим и архитектурным памятникам второго тысячелетия нашей эры Новгородской, Московской и Ярославской областей. Получено 16 новых определений напряженности по группам фрагментов (Таблица 6.1.), точно датированных между началом XII в. и первой третью XIX в. Результаты археомагнитных исследований отвечают 9 из 12 критериев качества данных [Biggin, Paterson, 2014; Gallet, Le Goff, 2006], что соответствует мировому уровню определений напряженности магнитного поля Земли.

Петромагнитные исследования показали наличие основного магнитного минерала-носителя естественной остаточной намагниченности – титаномагнетитового ряда. Значения напряженности древнего геомагнитного поля, полученные в ходе данной работы, свидетельствуют о тенденции уменьшения магнитного момента без резких максимумов и минимумов с 9.6×10^{22} по 8.5×10^{22} Ам² в течение XI – середины XVI вв. и значения от 7.5×10^{22} Ам² до 6.9×10^{22} Ам² во временном интервале с начала XVIII по середину XIX вв.

Сравнительный анализ полученных в ходе работы значений напряженности геомагнитного поля с региональной эталонной кривой по Западной Европе [Genevey et al., 2013] показывает их хорошую согласованность в рамках

погрешностей. Это может свидетельствовать об отсутствии заметного влияния недипольных источников геомагнитного поля на территории Западной Евразии во втором тысячелетии нашей эры. Полученные данные датированных второй половиной XVIII – первой третью XIX веков показывают линейную эволюцию напряженности геомагнитного поля, что соответствует характеру поведения геомагнитного поля, предсказанную моделями [Licht et al., 2013; Gubbins et al., 2006; Finlay, 2008]. Новые данные о напряженности геомагнитного поля Центральной России позволят скорректировать региональные и планетарные модели геомагнитного поля.

Задача 1.7. Реконструкция вариаций геомагнитного поля последних тысячелетий по записям в донных отложениях современных озёр европейской части России: калибровка амплитуд с использованием археомагнитных данных.

Актуальность

Донные отложения современных озёр являются уникальным архивом записей изменений окружающей среды, климата, геомагнитного поля за последние тысячелетия [Gilbert et al., 2006]. Качество этих реконструкций зависит от полноты колонок донных отложений, отсутствия перерывов и размывов в исследуемых разрезах, от степени сохранности первичной структуры осадков. Предварительные сейсмоакустические исследования позволяют выявить такие зоны в озере и наметить области, предпочтительные для отбора керновых колонок [Fanetti D. et. al., 2008; Moernaut J., et. al., 2010; Cukur D., et. al. 2013; Крылов П.С., и др. 2014]. Палеомагнитные исследования озёр Центральной России и Приуралья позволяют проследить палеовековые вариаций (PSV) геомагнитного поля на протяжении голоцена в Восточно-Европейском регионе и помогут установить характер их миграции по поверхности Земли.

Целью настоящих исследований является реконструкция характера вариаций элементов геомагнитного поля в Европейской части России по лимномагнитным данным.

Для достижения поставленной цели, нами были решены следующие **задачи**:

1. Выбор озёр, в которых возможно обнаружение донных отложений с ненарушенной стратификацией и наибольшей скоростью накопления осадков,

2. Выбор мест оптимального отбора колонок донных отложений для лимномагнитных исследований (полнота разреза, отсутствие газовых потоков, антропогенных нарушений осадка) на основе детальных сейсмоакустических исследований;
3. Бурение и отбор колонок донных отложений, отбор образцов с использованием специального пробоотборника, позволяющего не деформировать полужидкие образцы;
4. Перевозка и хранение образцов до измерений, измерение образцов с использованием крио-магнитометра, выбор режимов магнитной чистки, выделение компонент намагниченности, несущих информацию о геомагнитном поле времени накопления осадков;
5. Проведение комплексных магнитно-минералогических исследований;
6. Проведение комплексных палеоклиматических исследований;
7. Корреляция и суммирование колонок по одному озеру, создание мастер-кривой вариаций лимномагнитных параметров с оценкой значимости изменений для каждого озера;
8. Корреляция лимномагнитных мастер-кривых в регионе, создание мастер-кривых вариаций лимномагнитных параметров.

Методы и объекты исследований

Накопленная априорная информация по изученности озер европейской части России, а также многолетний опыт исследований позволили наметить ряд озер для проведения сейсмоакустического профилирования. В 2017 г. такие исследования проводились для озер республик Марий Эл, Татарстан, Башкортостан и Челябинской области. Эти работы показали, что из 8 изученных озер, наиболее перспективными объектами, где наилучшим образом могла сохраниться палеомагнитная запись, являются озера Челябинской области и Республики Башкортостан. Планируется, что эти озера станут объектами дальнейших детальных лимномагнитных исследований. На данном этапе проекта

была проведена экспедиция к озеру Тургойк (Челябинская область). Было отобрано 6 керновых колонок мощностью от 4 до 5.7 м. Проведен детальный отбор образцов (более 1300) с шагом 2 см для комплексных лабораторных 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. Комплекс магнито-минералогических методов включал в себя термомагнитный анализ, коэрцитивную спектрометрию, измерение магнитной восприимчивости, сканирующую и просвечивающую микроскопию магнитного сепарата проб осадков. По петромагнитным параметрам выполнена корреляция изученных колонок. С использованием магнитной чистки переменным магнитным полем выделена компонента намагниченности, несущая информацию о геомагнитном поле времени накопления осадков по пилотным образцам коллекции.

Определение абсолютного возраста проведено радиоуглеродным методом в лаборатории NTUAMS Факультета наук о Земле Национального университета Тайваня (Тайпей, Тайвань) по ряду проб осадков озер Плещеево (Ярославская область) и Большой Кисегач (Челябинская область). Подготовлены пробы озера Тургойк и направлены в лабораторию NTUAMS для датирования. Полученные датировки радиоуглеродным методом по образцам озер Кисегач и Плещеево позволили создать мастер-кривые вариаций лимномагнитных параметров с оценкой значимости изменений для каждого озера. А также внести

изменения в созданные ранее региональные мастер-кривые вариаций лимно-магнитных параметров с учетом полученных результатов по этим озерам.

Озеро Большой Кисегач.

Кисегач самое большое озеро в Чебаркульском районе, 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. В 2016 г. было отобрано 5 керновых колонок донных отложений мощностью от 4.6 до 5.3 м. Палеомагнитные исследования проведены по 4 кернам.

Озеро Плещеево

Озеро Плещеево 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 Трубезж, вытекает река Векса. В рамках экспедиций 2000 и 2015 г.г. отобрано 6 керновых колонок донных отложений мощностью от 2.7 до 6.3 м. Палеомагнитные исследования проведены по 5 кернам.

Озеро Тургояк

Тургояк является вторым озером России по чистоте воды после Байкала. Площадь водной поверхности озера составляет 26,4 км². Высота над уровнем моря 320 м. Средняя глубина - 19 м., максимальная глубина достигает 36.5 м. Площадь акватории 2638 га. Площадь водосбора составляет 476 км². На территории водосбора расположено озеро Инышко, имеющее гидравлическую связь с Тургояком. Питание озера в основном обеспечивают грунтовые воды, реки и ручьи, впадающие в озеро. Котловина озера тектонического происхождения. Отобрано 6 керновых колонок донных отложений мощностью от 4 до 5.7 м. Магнитные исследования проведены по 5 кернам. Расположение сейсмических профилей, точек отбора керна и проб воды отображено на Рис. 7.1.

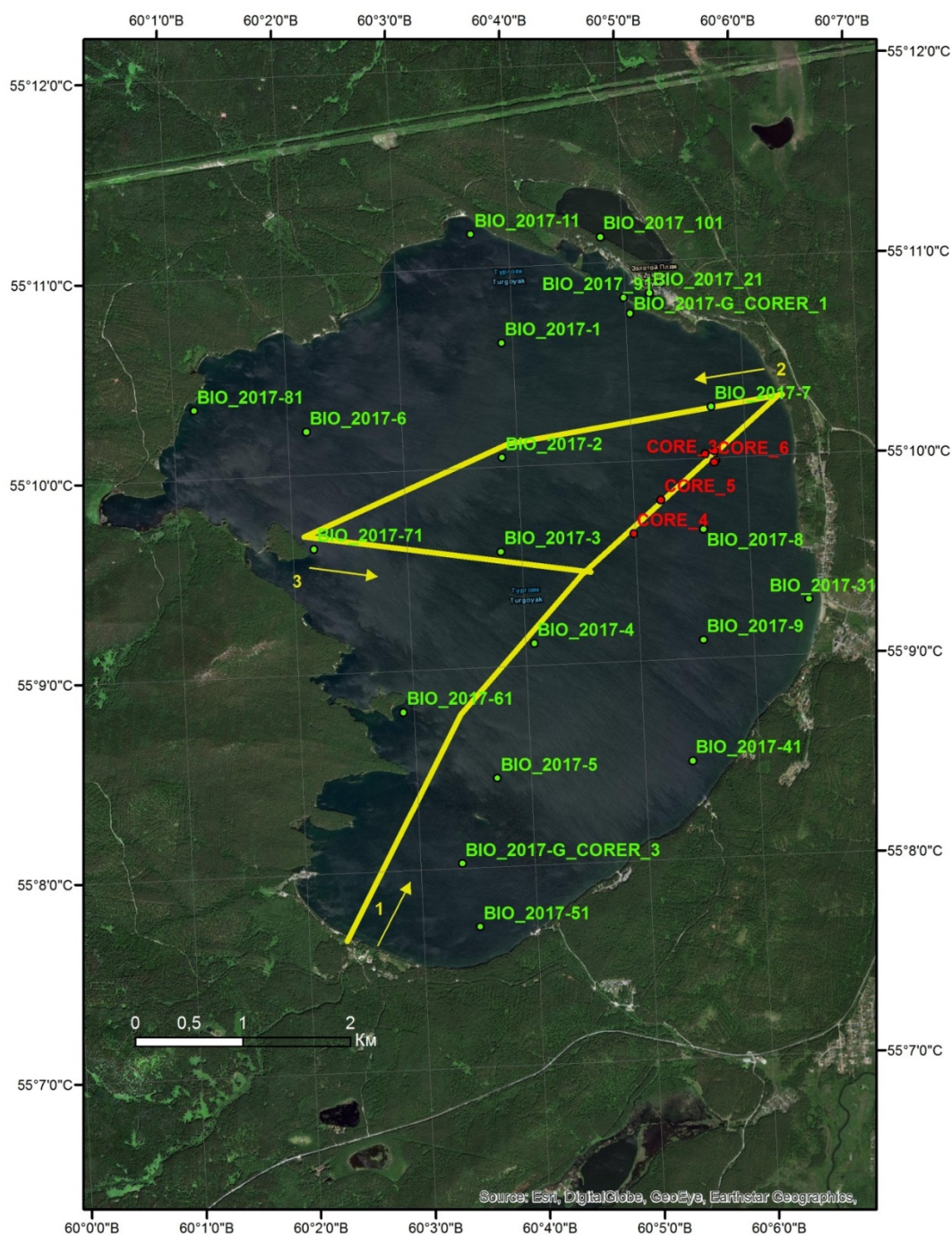


Рис. 7.1. Схематичная карта расположения сейсмоакустических профилей (желтые линии), отбора керна донных отложений (красные точки), отбора проб воды (зеленые точки).

Определение возраста донных отложений.

Радиоуглеродное датирование осадков проведено в лаборатории NTU-AMS с использованием масс-спектрометра акселерационного типа. Возраст был определен с использованием калибровочной кривой CalPal2007_HULU

(<http://www.calpal-online.de/>). При этом были выбраны временные интервалы с наибольшей вероятностью. Для определения возраста отложений озера Плещеево было проведено радиоуглеродное датирование 6 образцов, озера Кисегач – 6 образцов. 12 проб осадков озера Тургойак были подготовлены и отправлены для радиоуглеродного датирования в Тайпей. Согласно исследованиям на протяжении голоцена средняя скорость осадконакопления в центральной части котловины озера Плещеево составляет 1.1 м/1000лет, и более чем в два раза превышает среднюю скорость осадконакопления исследованных ранее керновых колонок, расположенных на некотором удалении от центра котловины. В оз. Кисегач средняя скорость осадконакопления составила порядка 0.4 м/1000лет. Изменение скорости осадконакопления ряда озер Европейской части России, восточной и западной Европы, а также результаты археомагнитных исследований отражены на Рис. 7.2. Точки с радиоуглеродными датами по образцам озера Кисегач четко ложатся в общий тренд.

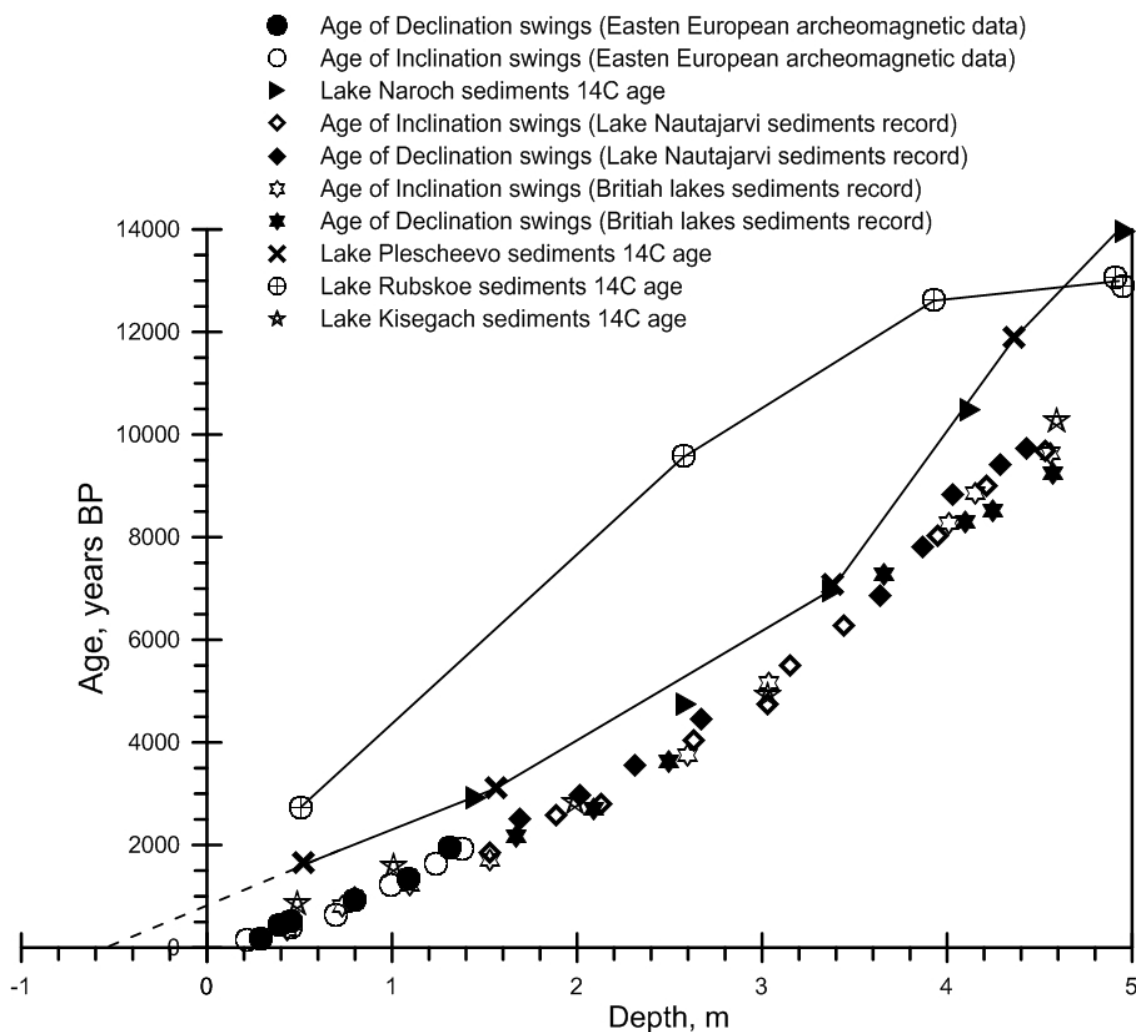


Рис. 7.2. Схема сопоставления данных, отражающих скорость осадконакопления озер Европы и европейской части России, а также археоманитных данных.

Результаты исследований

Озеро Кисегач.

На данном этапе проекта результатом исследований являются построенные мастер-кривые склонения и наклонения. Для определения возрастной привязки осадков до 2500 лет использовались археоманитные данные по Великобритании, Болгарии, Франции, Венгрии и Украине. Проведено сравнение склонения и наклонения археоманитных и лимноманитных данных по озеру Кисегач; сопоставление мастер-кривых по озеру с мировыми лимноманитными данными (Рис. 7.3.). Все определенные по мировым

лимномагнитным данным экстремальные периоды четко определяются на мастер-кривых оз. Кисегач.

Озеро Плещеево.

На данном этапе проекта результатом исследований являются построенные мастер-кривые склонения и наклонения с учетом полученных дополнительных датировок по осадкам, отобранным в ходе экспедиции 2015 г. Для определения возрастной привязки осадков до 2500 лет использовались археомагнитные данные по Великобритании, Болгарии, Франции, Венгрии и Украине. Проведено сравнение склонения и наклонения археомагнитных и лимномагнитных данных по озеру Плещеево; сопоставление мастер-кривых по озеру Плещеево с мировыми лимномагнитными данными. Все определенные по мировым лимномагнитным данным экстремальные периоды четко определяются на мастер-кривых оз. Плещеево (Рис. 7.3.).

Данные по осадкам озер Плещеево и Кисегач были сопоставлены с археомагнитными [Daly, Le Goff, 1996], с данными по Британским озерам [Turner, Thompson, 1982], с данными по озеру Наутайарви [Ojala, Saarinen, 2002], с данными по Белорусским озерам [Nourgaliev et. all., 2005].

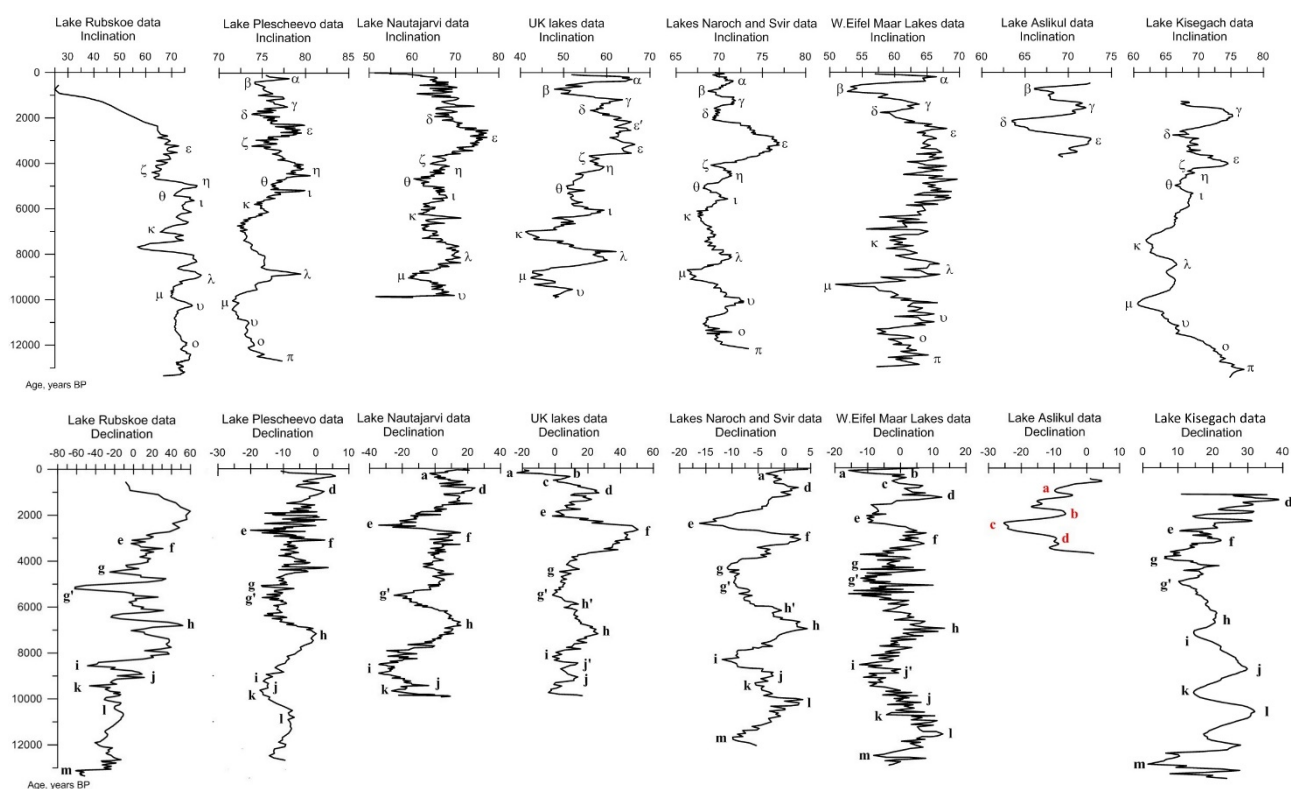


Рис. 7.3. Сводная схема сопоставления вариаций наклонения и склонения по осадкам озер Большой Кисегач и Плесеево с мировыми лимномагнитными данными.

Озеро Тургояк.

По образцам 5 керновых колонок проведены измерения магнитной восприимчивости (Рис. 7.4.) и NRM, послужившие основой для детальной корреляции разрезов оз. Тургояк. Также проведен магнитно-минералогический анализ на основе комплекса методов включающих коэрцитивную спектрометрию, термомагнитный анализ и сканирующую и просвечивающую электронную микроскопию с зондированием образцов магнитного сепарата.

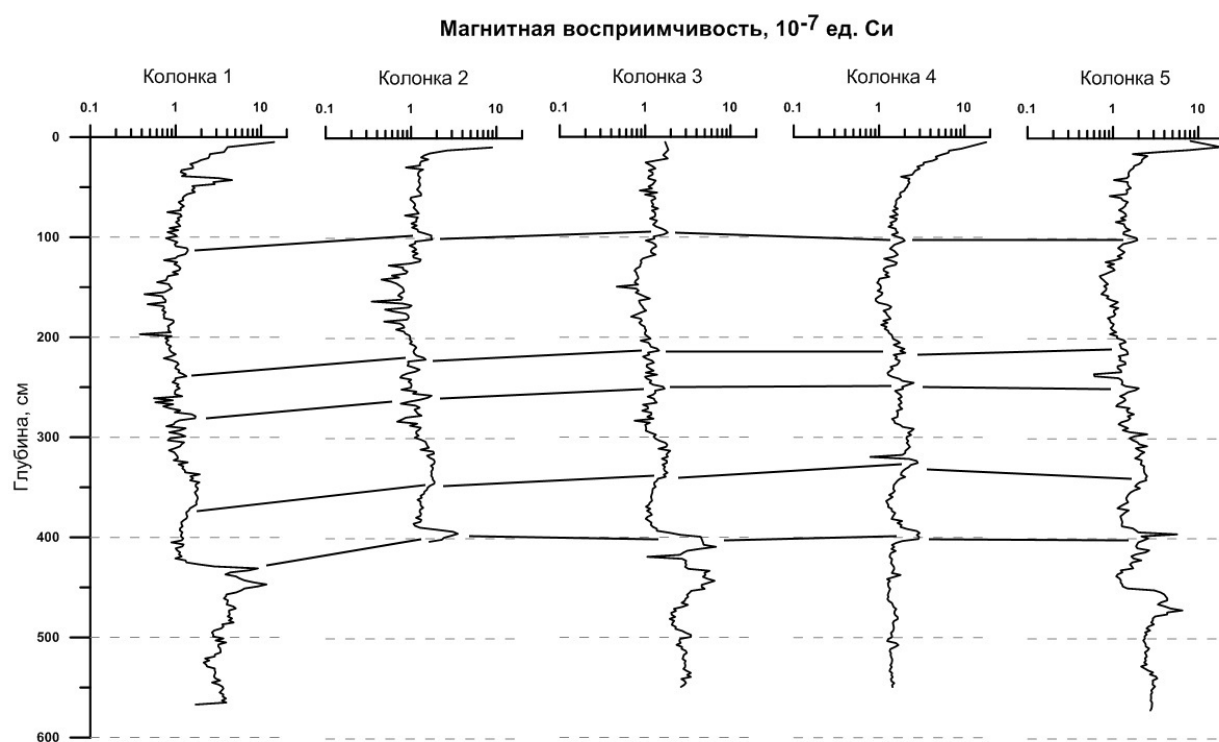


Рис. 7.4. Схема сопоставления керновых колонок оз. Тургойак по данным магнитной восприимчивости.

По результатам исследований вариаций магнитного поля по озерам Европейской части России с использованием осадков озер Рубское, Плещеево и Кисегач построены региональные мастер-кривые. Визуально на кривых изменения склонения и наклонения обнаруживается ряд особенностей, которые могут быть использованы для корреляции с другими записями вариаций геомагнитного поля в данном временном интервале.

Выводы

Предварительные исследования магнитными методами осадков озера Тургойак позволяют сделать вывод о носителях естественной остаточной намагниченности отложений. Здесь важную роль играют как крупные обломочные частицы оксидов и сульфидов железа, так и мелкие наноразмерные биогенные зерна. Поведение магнитной восприимчивости по разрезу позво-

ляет судить о приблизительном датировании осадков, которое может быть более 13000 лет. О чем свидетельствует возрастание значений на глубине порядка 4х метров. Вероятно, самые длинные колонки могут содержать как голоценовые отложения, так и плейстоценовые.

Средняя скорость осадконакопления озера Кисегач составляет 0.4м/1000 лет, причем разброс на протяжении голоцена незначителен. Это свидетельствует о том, что характер осадконакопления озера в основном контролируется климатическими изменениями, влиянием тектонического фактора можно пренебречь. Абсолютные датировки разрезов, корреляции на основе лимномагнитных и археомагнитных данных свидетельствуют о нескольких этапах изменения условий климатической системы в течение голоцена на территории европейской части России.

Обнаружена хорошая корреляция кривых изменения склонения и наклонения за последние 13000 лет по лимномагнитным данным озера Кисегач 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.

По результатам исследований вариаций магнитного поля по озерам Плещеево и Большой Кисегач, уточнены региональные мастер-кривые для центральной европейской части России. В записях наклонения отмечаются некоторые характерные интервалы, например, β , δ , ξ , θ , κ и μ , отмечаются минимумами, а α , γ , ϵ , η , ι , λ и ν максимумами [Turner, G.M., Thompson, R., 1982; Creer K.M. et. al., 1983]. Пики кривой изменений склонения также отражают особенности поведения данного параметра в голоцене. Минимумы a , e , g , i и k идентифицированы как западное склонение, а d , f , h , j и l – как восточное склонение [Creer K.M. et. al., 1983].

Задача 1.8. Изучение связи временных и пространственных характеристик вековых вариаций геомагнитного поля.

Введение

Связь пространственных масштабов слагаемых магнитного поля и масштабов изменчивости их во времени важна для понимания скоростей изменений реального магнитного поля, для прогноза масштабных вариаций на заданном интервале времен, для описания прошлой истории Земли, для тестирования моделей геодинамо.

Опыт предшествующих работ показывает, что связь временных и пространственных характеристик вековых вариаций поля может быть выявлена чисто эмпирически, но требуемый для корректного анализа объем данных весьма велик. Существующие базы архео- и палеомагнитных данных для такого исследования пока недостаточны и лишь позволяют выдвигать некоторые гипотезы.

С другой стороны, в последнее время появилась возможность работы с вычислительными моделями геодинамо, достаточно реалистично воспроизводящими основные характеристики земного магнитного поля. В рамках планируемого исследования предполагается выполнить корректный статистический анализ вычислительных решений геодинамо для выявления пространственно-временных связей геомагнитных вековых вариаций. Конкретно, речь идет о поиске формулы, связывающей масштабы вариаций во времени коэффициентов сферического разложения геомагнитного поля со значениями параметров их степеней и порядков. Ранее такой анализ не проводился. В 2017 г. нами были выполнены работы по получению массива данных геодинамо, достаточного для выполнения корректных статистических описаний и для проверки ряда гипотетических статистических свойств, реально наблюдаемых палеомагнитных данных. На основе этих результатов в будущем 2018 г. будет сформулирована и проверена общая гипотеза (формула), связывающая масштабы

вариаций во времени коэффициентов сферического разложения поля со значениями параметров степени и порядка.

Объекты и метод исследования

В ходе проведенных исследований нами использовались численные расчёты геодинamo, аналогичные приведенным в работе [Lhuillier et al., 2013]. При расчётах жидкое внешнее ядро Земли моделировалось проводящей сферической оболочкой с отношением внутреннего и внешнего радиусов $r_i/r_0 = 0.35$, вращающейся с угловой скоростью Ω вокруг оси z . Уравнения магнитной индукции для магнитного поля $\mathbf{B}$ решались в МГД приближении, уравнения Навье-Стокса и переноса для поля скоростей $\mathbf{u}$ и фракции лёгких элементов решались в приближении Овербека-Буссинеска. На поверхности ядра принимались граничные условия прилипания. Предполагалось, что внутреннее и внешнее ядра имеют одинаковую проводимость. Полагалось также, что генерация поля идёт за счёт химической конвекции при постоянном потоке лёгких элементов на границе внешнего и внутреннего ядер и нулевом потоке на границе ядро-мантия.

Концентрация лёгких элементов нормировалась на $|S|/\Omega$, где S – отрицательный объёмный источник. Свойства модели контролировались четырьмя параметрами: числом Экмана, характеризующим относительную величину вязких и кориолисовых сил, гидродинамическим числом Прандтля, магнитным числом Прандтля, числом Рейнольдса, характеризующим интенсивность конвекции.

Принятая модель рассчитывалась при использовании программы PaRoDy-JA [Dormy et al., 1998; Aubert et al., 2008], симулирующей работу геодинamo. Численные расчёты велись с разрешением до сферических гармоник 44 порядка.

Метод исследования состоял в передискретизации имеющихся решений на равномерный по времени шаг и дальнейшим рутинным методам оценки ширины автокорреляционной функции. При этом используются оба подхода к вычислению корреляций: стандартный метод Пирсона и ранговая корреляция по Спирмену.

Основные результаты

Ранее было известно, что ширина $a(n)$ автокорреляционной функции суммы всех гармоник данной степени, рассматриваемая как случайный во времени процесс, обратно пропорциональна величине параметра n^s , где s очень близко к единице. Оказалось, что при этом автокорреляционные свойства слагаемых одной степени существенно различаются, например, ширина $a(n,0)$ автокорреляционной функции зонального коэффициента $g_n^0(t)$ приблизительно вдвое превосходит ширину $a(n,n)$ автокорреляционной функции для коэффициента $g_n^n(t)$. Путем многократных вычислений были проверены приближения автокорреляционной ширины для любого коэффициента степени больше единицы: автокорреляционная функция для $g_n^m(t)$, $h_n^m(t)$ имеет эффективную ширину, приближенно оцениваемую как $C(n)/(m+n)$, где $C(n)$ – медленно возрастающая по параметру n функция/

Следует, однако, помнить, что пока в этом исследовании удалось сформулировать сведения лишь об асимптотическом поведении автокорреляций, поскольку наличествует геометрически несложная, но пока неясная на аналитическом уровне структура зависимости от (n,m) произведения $\text{Const} \cdot (n+m) \cdot a(n,m)$. Ее можно видеть на графике (Рис. 8.1.), где для наглядности параметры ширины для $g_n^m(t)$, $h_n^m(t)$ показаны как $a(n,m)$ и $a(n,-m)$ соответственно.

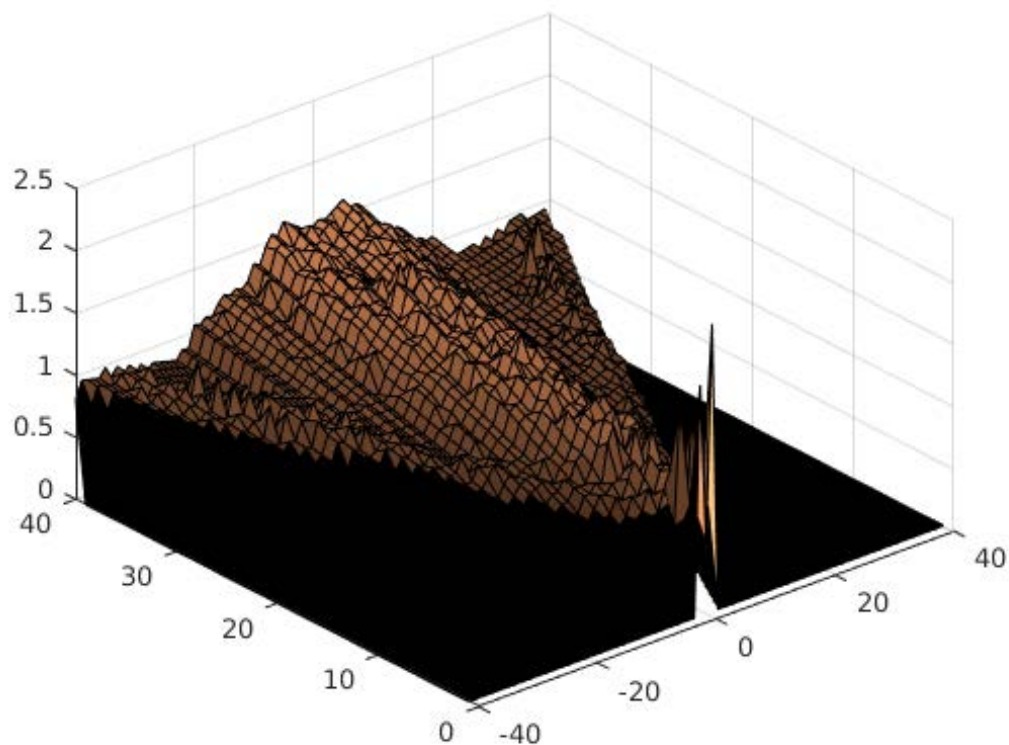


Рис. 8.1. Структура зависимости произведения $\text{Const} \cdot (n+m) \cdot a(n,m)$ от (n,m) .

Обсуждение и выводы

Предпринятое исследование нацелено на то, чтобы по реальным данным автокорреляционных свойств гармоник высоких степеней (доступных, например, по обновляемым моделям IGRF) научиться оценивать масштабы изменчивости гармоник малых степеней, описывающих крупномасштабную изменчивость. Полученные результаты о существовании связей этих масштабов уже сейчас позволяют провести указанную оценку, точность которой, однако, пока представляется недостаточной из-за не проясненной до конца дополнительной геометрической структуры зависимости от (n,m) произведения $\text{Const} \cdot (n+m) \cdot a(n,m)$ (см. Рис. 8.1.). Предстоит еще проверить дополнительные гипотезы о связях масштабов автокорреляций коэффициентов $g_n^m(t)$ и $h_n^m(t)$ с масштабами их взаимных корреляций [Bouligand et al. 2005].

1.9. Тестирование существования в геологической истории длительных аномальных режимов работы геодинамо.

Введение

Хорошо известно (см., напр. [Merril et al., 1996]), что магнитное поле Земли на протяжении геологической истории могло находиться в двух состояниях: 1) Стабильном (прямой или обратной полярности), с преимущественно дипольной геометрией и широким спектром длин интервалов полярности от сотен тысяч до десятков миллионов лет; 2) Переходном (инверсионном), со сложной геометрией поля и с продолжительностью от нескольких сотен до первых тысяч лет.

Исследования последних лет [Павлов и др., 2004; Abrajevitch and Van der Voo, 2010; Biggin et al., 2012; Bazhenov et al., 2016; Halls, 2015] и др. указывают на то, что в истории Земли возможно существовали достаточно длительные (порядка нескольких миллионов лет и более) периоды времени, в течение которых состояние поля, не вписывалось ни в один из названных выше режимов. Главной характеристикой этого нового фундаментального состояния является гиперактивность, т.е. крайняя вариабильность основных параметров поля (направления, напряженности, амплитуды вековых вариаций и т.д.) и/или существенное отклонение от аксиальной дипольной геометрии.

Одним из таких периодов, вероятно, являлась переходная эпоха от протерозоя к фанерозою, отвечающая концу эдиакария (венда) - началу кембрия. Нами рассмотрены палеомагнитные данные по ряду геологических объектов преимущественно раннекембрийского возраста, расположенных на севере, северо-востоке и востоке Сибирской платформы, которые позволяют, в определенной степени, тестировать эту гипотезу.

Объекты исследований

К началу - середине 2000-ых годов сложилась ситуация, когда для нижнего кембрия Сибири было предложено два в той или иной степени обоснованных резко отличающихся палеомагнитных полюса (соответствующих “храмовскому” и “киршвинковскому” направлениям), приводящие к существенно различным выводам о геодинамической истории Сибирской платформы и всей планеты в целом. Для разрешения этого противоречия необходимо было выполнить дальнейшие исследования нижнекембрийских пород, распространив их на соседние интервалы времени и на другие типы пород, отличавшихся от исследованных ранее. Крайне важным, было бы, получить раннекембрийскую палеомагнитную запись в изверженных телах, механизм формирования намагниченности которых отличен от такого в осадочных толщах. Это могло бы помочь избежать проблем, связанных с возможной длительностью формирования палеомагнитной записи в осадочных породах и со, связанным с этим, сложным наложением магнитных компонент.

Нами была выполнена обширная программа исследований нижнекембрийских и вендских (эдиакарских) пород Сибирской платформы. Результаты части этих исследований уже опубликованы [Gallet et al., 2003; Shatsillo et al., 2005]. В настоящей работе мы представляем результаты, полученные нами в последние несколько лет при исследовании нижнекембрийских (в одном случае - позднеэдиакарских) осадочных и магматических пород северо-востока и востока Сибирской платформы. В ходе работы были изучены: нижнекембрийские отложения эмяксинской свиты, обнажающейся в долине среднего течения р. Б.Куонамка (восточный склон Анабарского поднятия); пестроцветной свиты, выходящей на поверхность в долинах нижнего течения рек Белая и Мая (восток Сибирской платформы); позднеэдиакарские (немакит-далдынские) отложения сарданинской свиты Кыллахского хребта (восток Сибирской платформы), а также базитовые силлы Чекуровской антиклинали (северо-восток Сибирской платформы, долина нижнего течения р. Лена, Рис. 9.1.).

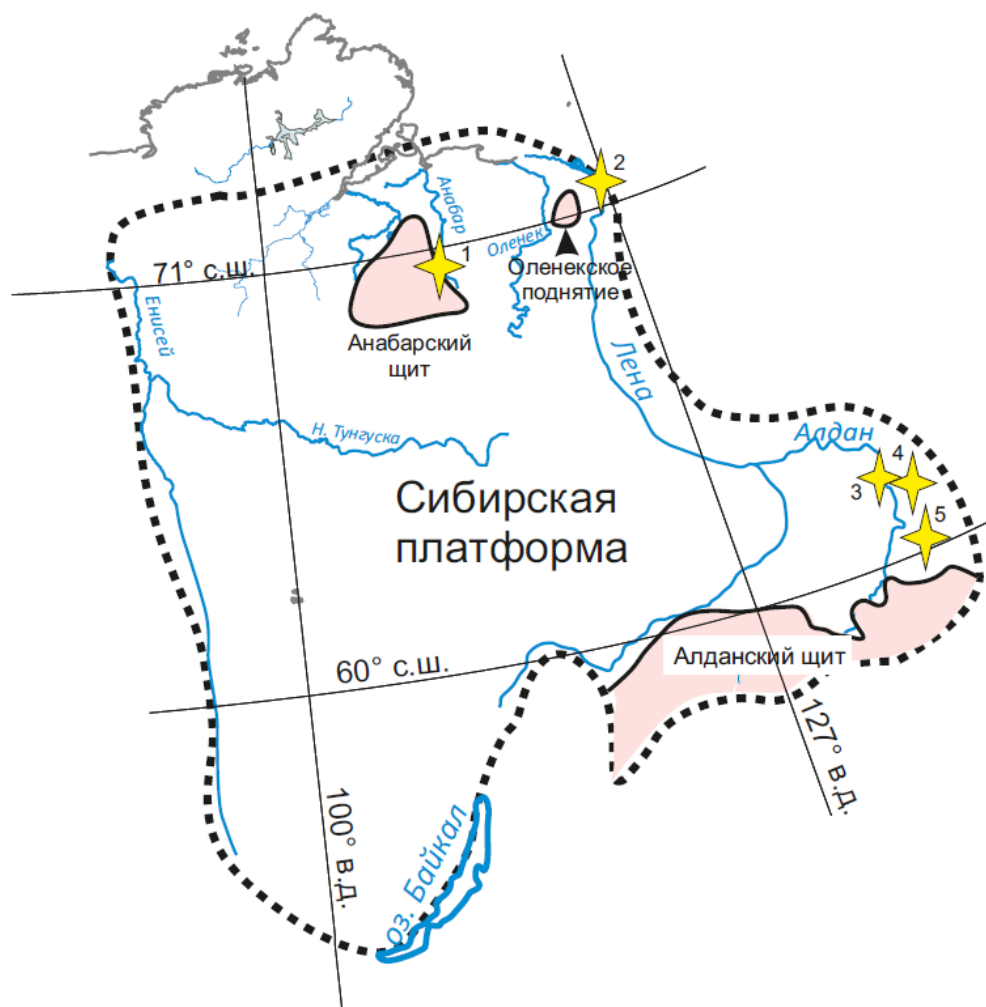


Рис. 9.1. Географическое положение изученных объектов.

Палеомагнитный анализ

Отобранные коллекции были изучены согласно стандартным палеомагнитным методикам [Храмов и др., 1982; Butler, 1998; Tauxe, 2010]. Выделение компонент намагниченности осуществлялось по результатам детальной температурной магнитной чистки, расчет направлений компонент выполнялся с использованием метода PCA [Kirschvink, 1980]. По изученным объектам получены следующие результаты:

Эмяксинская свита р. Б. Куонамка (Рис. 9.2.)

1) В изученных породах уверенно фиксируется присутствие “храмовской” компоненты намагниченности;

2) В значительном числе изученных образцов в процессе магнитной чистки наблюдаются тенденции, которые могут рассматриваться как указание на присутствие в породах биполярной компоненты с “киршвинковским” направлением. В “чистом виде” эта компонента не выделяется.

Пестроцветная свита р. Май.

1) Изученные нижнекембрийские породы пестроцветной свиты долины р. Май содержат древнюю компоненту намагниченности KHR, близкую к ожидаемому “храмовскому” направлению;

2) В ходе детальной чистки отдельных образцов наблюдаются особенности, которые могут рассматриваться как указание на присутствие в образцах “киршвинковской” компоненты. С другой стороны, эти особенности могут быть интерпретированы как результат наложения компонент KHR разной полярности.

Пестроцветная свита р. Белая и сарданинская свита Кыллахского хребта.

1) Изученные нижнекембрийские породы пестроцветной свиты долины р. Белой и верхнеэдиакарские породы сарданинской свиты Кыллахского хребта содержат только одну древнюю компоненту намагниченности KHR, близкую к ожидаемому “храмовскому” направлению (Рис. 9.3.А).

Силлы Чекуровской антиклинали.

1) Характеристическая компонента, выделенная в нижнекембрийских силах долины р. Нелегер, отвечает ожидаемому “киршвинковскому” направлению (Рис. 9.3.Б);

2) Других стабильных компонент, помимо низко-среднетемпературной компоненты, имеющей либо мезозойский, либо современный возраст в изученных объектах не обнаружено.

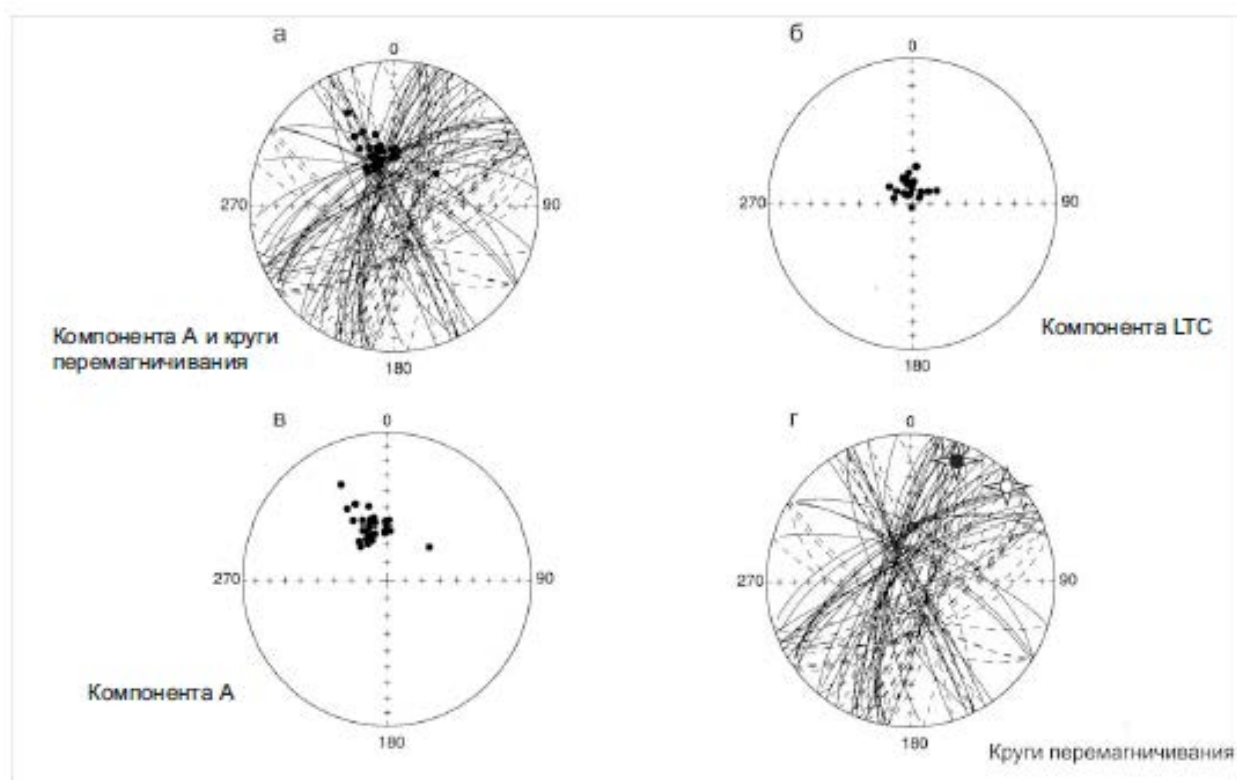


Рис. 9.2. Распределение компонент намагниченности, выделенных в нижнекембрийских отложениях эмяксинской свиты р. Куонамка.: а – компонента KHR с кругами перемангничивания; б- низкотемпературная компонента; в- компонента KHR; г – кругиперемангничивания, указывающие на наличие компоненты KRS.

Обсуждение результатов.

Аномальный характер палеомагнитной записи в породах позднего эдиакария- нижнего кембрия Сибирской платформы.

Полученные данные, уверенно подтверждают справедливость сделанного нами ранее [Павлов и др., 2004] заключения о том, что в значительной части переходных венд-кембрийских слоев Сибирской платформы объективно существуют две стабильные высокотемпературные компоненты намагниченности, каждая из которых может рассматриваться в качестве первичной, образовавшейся не позднее раннего кембрия.

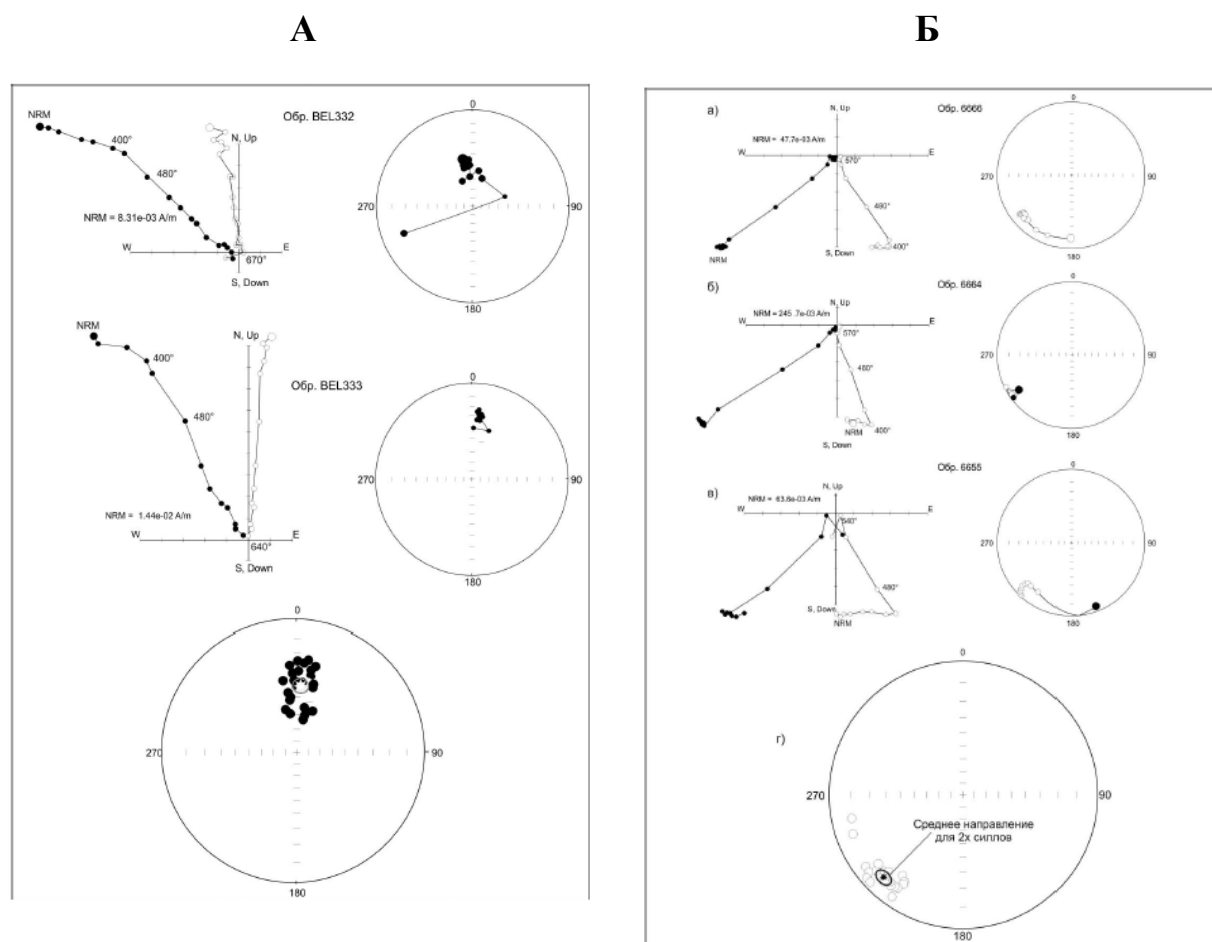


Рис. 9.3. А - “Храмовская” компонента в пестроцветной свите р. Белая; **Б** - “киршвинковская” компонента в базитовых силлах р. Нелегер.

Однако, наличие двух различающихся “первичных” компонент, очевидно, противоречит традиционным представлениям о палеомагнитной записи, как отражающей преимущественно аксиально-дипольный характер геомагнитного поля. Поэтому мы вынуждены искать альтернативное объяснение наблюдаемым фактам.

В качестве возможного объяснения мы предлагаем следующую гипотезу. Обе рассматриваемые компоненты в осадочных породах являются первичными в том смысле, что они образовались либо в момент отложения исследуемых осадков, либо вскоре после. Эти компоненты могут иметь как синсе-

диментационную, так и раннедиагенетическую природу. Разница же направлений обусловлена тем, что геомагнитное поле в конце позднего венда и в начале кембрия имело аномальный характер с относительно продолжительными периодами господства аксиального монополярного дипольного поля, записанного в виде компоненты KHR, перемежающегося с относительно кратковременными эпохами преобладания, инвертирующего близэкваториального диполя, записанного в виде компоненты KRS. Полученные в настоящей работе данные существенно расширяют доказательную базу этой гипотезы.

Представляется, что такое поведение магнитного поле могло бы объяснить большинство тех особенности палеомагнитной записи, которые мы наблюдаем в разрезах, и примирить, казалось бы, антагонистические результаты, полученные разными исследователями.

Анализ мировых данных.

Если аномальное поле в рассматриваемый интервал времени действительно существовало, это явление должно иметь планетарный масштаб и проявляться на других континентах. В работе [Shatsillo et al, 2005] нами выполнен детальный анализ венд- кембрийских определений Мировой Палеомагнитной Базы Данных [Pisarevsky and McElhinny, 2003], где показано, что наличие двух несогласующихся направлений в вендско-раннекембрийском интервале времени действительно может рассматриваться как явление планетарного масштаба, отражающее, по всей видимости, аномальный характер поведения магнитного поля Земли. При этом характерное угловое расстояние между соответствующими полюсами составляет, как правило, величину, близкую к 50° , что справедливо и для сибирских полюсов KHR и KRS (Рис. 9.4.).

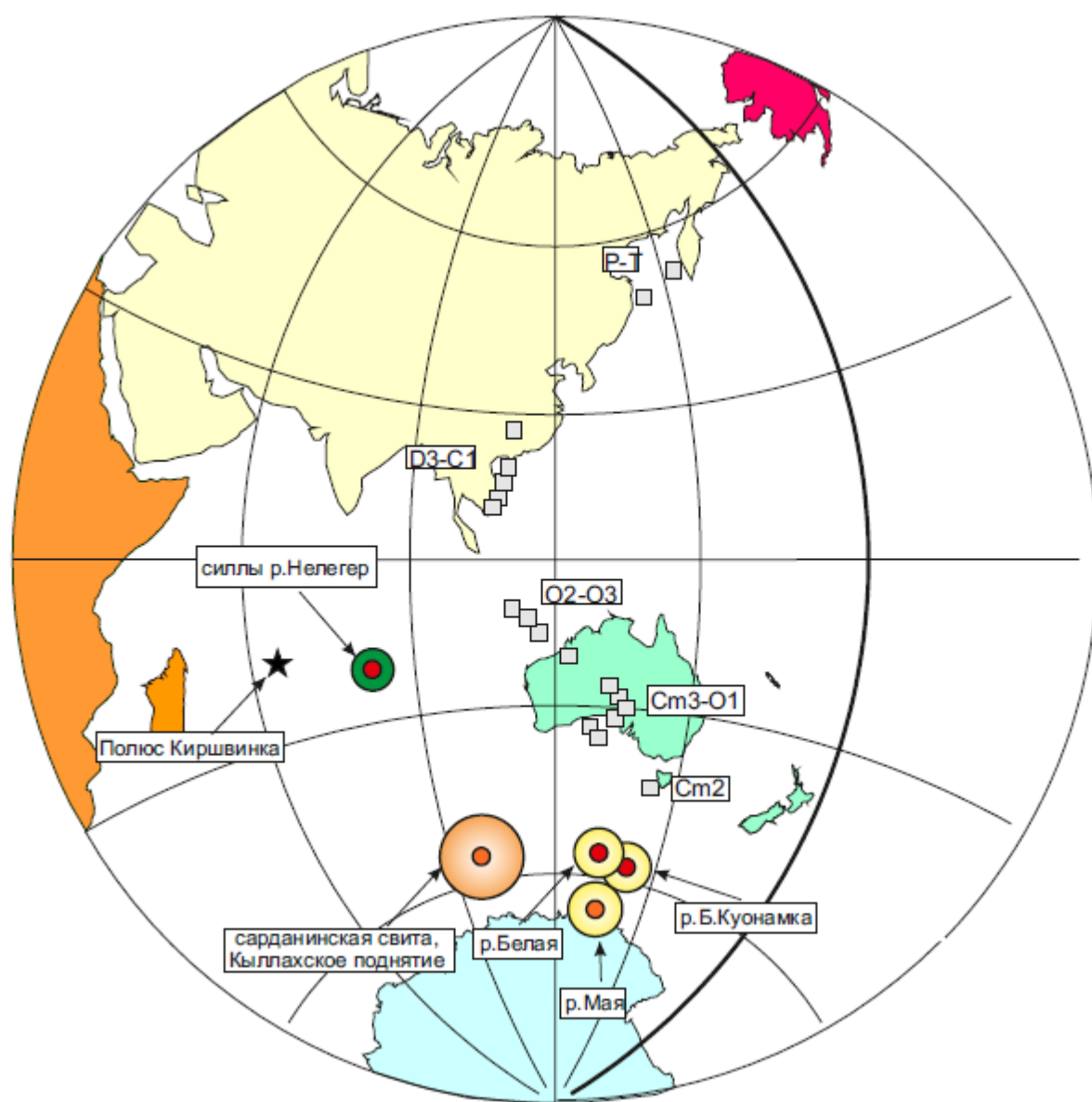


Рис. 9.4. Сравнение полученных полюсов, соответствующих KHR и KRS компонентам с палеозойскими полюсами Сибирской платформы. Прямоугольники соответствуют полюсам, взятым из [Smethurst et al., 1998]. Черной звездочкой обозначен полюс из работы [Kirschvink and Rozanov, 1984]. Возрасты палеозойских полюсов: Cm2 – средний кембрий, Cm3-O3- поздний кембрий – ранний ордовик, O2-O3- средний-поздний ордовик, D3-C1 – поздний девон- ранний карбон, P-T – пермь – триас.

Близкая по смыслу работа была выполнена недавно А. Абражевич и Р. Ван дер Ву [Abrajevitch and Van der Voo, 2009], которые показали, что палеомагнитные результаты, полученные по разным эдиакарским объектам Балтики

и Лаврентии, определенно указывают на сосуществование двух компонент намагниченности, одна из них с низким, другая - с высоким наклоном. При этом имеются серьезные аргументы (в частности – положительные результаты полевых тестов), указывающие на то, что обе компоненты являются первичными и очень близкими по возрасту. Традиционная интерпретация этих данных в рамках гипотезы центрального осевого диполя требует невероятно больших скоростей смещения континентов, недопустимых ни тектоникой плит, ни гипотезой истинного смещения полюса. Авторы утверждают, что единственным вероятным объяснением наблюдаемых данных, может являться крайне нерегулярное, аномальное поведение геомагнитного поля в это время, возможно описываемое чередованием осевого и квазиекваториального диполей. Такое поведение геомагнитного поля может являться следствием некоторых специфических условий в ядре и/или на границе ядро-мантия, что, в свою очередь, накладывает сильные ограничения на термальную эволюцию внутренних оболочек нашей планеты.

В недавней работе, выполненной Холлсом с соавторами [Halls et al., 2015] по гренвильским дайкам возраста ~ 585 млн. лет показано, что изученные дайковые рои, отличающиеся по возрасту не более, чем на 4 млн. лет (а, возможно, и значительно менее) несут первичную намагниченность с резко различающимися (порядка 90°) направлениями. Последнее невозможно объяснить, как простые геомагнитные вариации и не может быть отражением тектонических движений. Авторы предполагают, что одно из двух полученных ими направлений отвечает некоторому квазистабильному состоянию близэкваториального диполя, в значительной степени определяющего геометрию поля в процессе смены его полярности. Роль этого близэкваториального диполя значительно возрастает в периоды гиперактивного состояния поля с крайне высокой частотой инверсий. Именно сочетанием высокой частоты инверсий и наличием относительно устойчивого близэкваториального диполя

авторы объясняют наличие двух резко отличающихся палеомагнитных направлений в близких по возрасту эдиакарских породах.

Таким образом, мировые данные хорошо согласуются с нашими результатами по Сибирской платформе и определенно поддерживают наш вывод об аномальном характере геомагнитного поля в эдиакарии – раннем кембрии.

Аномальное поле на границе докембрия и кембрия.

Для объяснения наблюдаемой палеомагнитной записи мы предлагаем гипотезу, согласно которой геомагнитное поле на границе докембрия и кембрия имело аномальный характер и характеризовалось наличием двух квазистабильных режимов генерации, поочередно сменяющих друг друга. Согласно этой гипотезе, магнитное поле Земли на границе докембрия и кембрия может быть описано чередованием продолжительных периодов господства аксиального преимущественно монополярного дипольного поля, записанного в виде компоненты KHR, перемежающегося с относительно кратковременными эпохами преобладания инверсирующего близэкваториального или среднеширотного диполя, записанного в виде компоненты KRS.

Близкая по смыслу двухдипольная модель предлагалась Песоненом и Неванлинна [Nevanlinna and Pesonen, 1983] для объяснения асимметричных инверсий, зафиксированных ими в разрезах серии Кивино (1100-1000 Ma).

Важно подчеркнуть, что мы не настаиваем, что наблюдаемая палеомагнитная запись с необходимостью требует реализации двухдипольной модели – другим возможным объяснением наблюдаемого феномена может быть, например, предположение о, временами, значительном вкладе недипольных составляющих в геомагнитное поле границы докембрия и фанерозоя. Так или иначе, проведенный анализ сибирских и мировых палеомагнитных данных свидетельствует в пользу того, что геомагнитное поле позднейшего венда и раннего кембрия заметно отличалось от геомагнитного поля большинства последующих эпох.

Очень интересным и, возможно, не случайным фактом является то, что предлагаемая нами модель удивительным образом перекликается с моделью геомагнитных инверсий, развиваемой А.Н. Храмовым с сотрудниками на основе изучения этих инверсий в раннем палеозое [Храмов и Иосифиди., 2012]. Согласно этой модели, в процессе инверсий происходит уменьшение вплоть до полного разрушения поля центрального осевого диполя. При этом геомагнитное поле не исчезает полностью, но определяется уже суперпозицией экваториального диполя и недипольных компонент. При этом, согласно [Храмов и Иосифиди., 2012] величина неосевых компонент может составлять 15-20% от величины дипольного аксиального поля. По сути дела, эта модель могла бы полностью описать наблюдаемые нами особенности поздневенд-раннекембрийской палеомагнитной записи, при допущении инверсий неосевого диполя. В этом случае аксиально-дипольное поле, записанное в компонентах типа KHR, являлось бы нормальным, обычным устойчивым полем, а компоненты типа KRS отражали бы некоторое переходное состояние, похожее на то, которое описывают под названием “экскурсов” геомагнитного поля. При этом надо также допустить, что важной характеристикой таких экскурсов (назовем их суперэкскурсами) являлось бы наличие во время их реализации некоторых преимущественных приблизительно антиполярных положений магнитных “полюсов”, обязанных своим происхождением инверсиям неаксиального диполя.

Возможность существования такого диполя подтверждается результатами анализа массива биполярных палеомагнитных определений, содержащихся в Международной Базе палеомагнитных данных [Храмов и Иосифиди, 2012]. Рассмотренные данные поддерживают модель палеомагнитного поля (для ряда геологических эпох), согласно которой оно имеет в своем составе долгоживущую компоненту, соответствующую экваториальному диполю. Этот диполь и обуславливает неантиподальность палеомагнитных направле-

ний в зонах прямой и обратной полярности в разрезах осадочных и вулканогенных толщ. Сохраняя свою величину в 5–8% от центрального осевого диполя экваториальный диполь в интервале 359–207 млн. лет назад несколько раз менял свою полярность. Его северные полюсы располагались на земной поверхности в виде двух антиподальных групп, лежащих в пределах или вблизи зон субдукции на периферии суперконтинента Пангея. Предполагается, что такая локализация экваториального диполя может быть связана с нисходящими ветвями мантийной конвекции и рельефом обеих границ внешней части ядра Земли.

Второй важной особенностью суперэкскурсов должна была бы быть их заметно большая длительность, по сравнению с обычными экскурсами, что должно обеспечить достаточно явное отражение суперэкскурсов в палеомагнитной записи. В таком случае гипотеза аномального поздневендского – раннекембрийского геомагнитного поля может быть выражена в несколько иной формулировке: Магнитное поле Земли на границе докембрия и кембрия было значительно менее стабильно, чем в кайнозой и нормальное состояние поля, отвечающее осевому диполю, часто прерывалось геомагнитными экскурсами, отличительными особенностями которых были:

а) преимущественная локализация виртуальных экскурсионных полюсов в двух грубо антиполярных областях земного шара, расположенных в средних-низких широтах;

б) относительно большая частота и длительность, чем в кайнозой.

Важно отметить, что согласно компьютерному моделированию, выполненному Дрисколлом и Олсоном [Driscoll and Olson, 2005], в процессе инверсий возможно состояние поля, которое, в первом приближении может быть описано наклоненным диполем. Таким образом, наша модель вполне согласуется и с данными компьютерного моделирования, если допустить (как и в случае модели Храмова) существование преимущественных областей магнитных

“полюсов” в процессе экскурса/инверсии и относительно повышенную длительность этих экскурсов/инверсий.

Существование преимущественного положения магнитных “полюсов” в процессе инверсий предлагалось рядом исследователей, объяснялось существованием неких неоднородностей на границе ядро-мантия и является предметом оживленных дискуссий [Clement, 1991; Tric et al., 1991a,b; Laj et al., 1991a,b; Prevot and Camp, 1993; Hofman, 1991, 1992; Quidelleur and Valet, 1994].

Теоретическая возможность существования динамо, генерирующего преимущественно экваториальное дипольное поле или сосуществования (с чередованием) экваториального диполя с аксиальным было показано в работах [Ishihara and Kida, 2002; Aubert and Wicht, 2004; Gissinger et al., 2012]. Обе конфигурации поля реализуемы в некотором пространстве параметров, определяемых комбинацией электрической проводимости и вязкости проводящего флюида и мощностью проводящего слоя. Как отмечается в работе [Abrajevitch and Van der Voo, 2009], вопрос о том, складывалась ли когда-нибудь в истории Земли такая комбинация параметров или нет, остается открытым.

При этом необходимо иметь в виду, что названные параметры существенным образом зависят от величин теплового потока в ядре и на границе ядро-мантия, состава, размера и возраста внутреннего ядра, тепловых свойств мантии – т.е. характеристик, которые для геологической истории Земли остаются все еще недостаточно хорошо ограниченными.

Наши данные позволяют ответить на этот вопрос, скорее, положительно.

Задача 1.10. Получение палеомагнитных ограничений на палеогеографическое и палеотектоническое положение Сибирской платформы (СП) в позднем неопротерозое.

Актуальность, цели, задачи

Несмотря на тот, что в последние годы получен ряд новых качественных палеомагнитных полюсов для неопротерозоя Сибирской платформы [Metelkin et al., 2016, 2010; Pavlov et al., 2015], проблема неопротерозойского сегмента траектории (кривой) кажущейся миграции полюса (ТКМП) Сибири все еще далека от своего разрешения. Наименее определенным, при этом, является участок кривой кажущейся миграции полюса, отвечающий позднему неопротерозою. Траектория кажущейся миграции полюса Сибирской платформа является концентрированным выражением ее дрейфа, разработка неопротерозойского сегмента ТКМП Сибири позволит получить существенные ограничения на палеогеографическое и палеотектоническое положение платформы в данном временном интервале. Последние 15 лет детально обсуждается последовательность неопротерозойских полюсов Сибири (применительно к разработке ТКМП) [Pavlov et al., 2002; Писаревский-Натапов, 2003; Писаревский и др., 2013; Shatsillo et al., 2006], однако до сих пор до конца неясны даже основные тенденции тренда неопротерозойских полюсов. Эта неопределенность во многом обусловлена крайне недостаточным числом надежных сибирских неопротерозойских полюсов, полученных к настоящему времени.

Основной целью настоящего исследования является получение новых надежных палеомагнитных полюсов для неопротерозоя Сибирской платформы и разработка современной сибирской кривой кажущейся миграции полюса для неопротерозоя.

Объекты и методы исследований

В течение 2017 г. основные усилия были направлены на выполнение лабораторных исследований, палеомагнитных коллекций, отобранных из опорных разрезов мезо-неопротерозоя севера Сибирской платформы в течение полевого сезона 2016 г. на территории Уджинского, Оленекского и Хараулахского поднятий.

На территории Оленекского поднятия было отобрано около 70 ориентированных образцов верхней части Хайпахской свиты. Верхняя часть Хайпахской свиты представлена красноцветными строматолитовыми известняками и перекрывается сверху с поверхностью размыва песчаниками маастахской свиты венда. Кровля Хайпахской свиты по изотопным данным имеет возраст ~920 млн лет (K-Ar метод) [Kashirtsev, 1985], или же 820 ± 15 (Rb-Sr метод) [Zaitseva, 2008]. Таким образом, палеомагнитное опробование известняков Хайпахской свиты представлялось крайне перспективным для получения палеомагнитного полюса для Сибирской платформы в неопротерозое.

На территории Хараулахского поднятия опробованная докембрийская часть разреза представлена (снизу-вверх):

Уктинской свитой – красноцветные алевролиты с линзами песчаников, аргиллитов. В верхней части доломиты со строматолитами;

Эсэлэхской свитой – строматолитовые доломиты;

Нелегерской свитой – битуминозные известняки;

Сиэтчанской свитой – переслаивание мергелей с известняками, доломитами и аргиллитами;

Хараяутехской свитой – переслаивание алевролитов, песчаников и известняков.

Данный разрез накапливался непрерывно, и по изотопным данным накопление Эсэлэхской – Хараяутехской свит происходило во время 820-580 млн. лет [Khabarov, 2014]. Более того, по результатам изучения обломочных

цирконов в Хараютехской свите время ее формирования не ~600 млн. лет (неопубликованные данные Павермана В.И.), что в целом согласуется с данными Хабарова Е.М. Таким образом, данный разрез также нами был признан перспективным для палеомагнитного изучения. Из него было отобрано в общей сложности ~200 ориентированных образцов.

На территории Уджинского поднятия из докембрийской части разреза нами были опробованы Унгуохтахская свита, представленная красноцветными алевролитами, туфами и туфобрекчиями, и Уджинская свита, представленная пестроцветными песчаниками и красноцветными алевролитами. Возраст Унгуохтахской свиты в настоящее время определяется как среднерифейский на основании находок микрофоссилий [Станевич и др., 2009; Гладкочуб и др., 2008]. Относительно возраста Уджинской свиты существует ряд вопросов. Так, по результатам работ Гладкочуба и Станевича возраст Уджинской свиты определяется также как среднерифейский, в то же время, необходимо отметить, что многие ученые коррелируют Уджинскую свиту с Хайпахской свитой Оленекского поднятия [Шпунт и др., 1982; Ипатов, 1976], а по последним изотопным данным Хайпахская свита формировалась вплоть до ~820 млн. лет.

Также на территории Уджинского поднятия было опробовано 7 магматических тел (даек и силлов основного состава) докембрийского возраста. В настоящий момент существует лишь несколько изотопных датировок этих базитовых тел. Так, по советским данным, возраст Большой Уджинской Дайки равен ~910 млн. лет (K-Ar) [Осипова, Поршенев, 1966], возраст базитового тела в истоках р.Томтор - 1074 ± 11 млн. лет. (Ar-Ar) [Гладкочуб и др., 2008]. По неопубликованным данным возраст некоторых исследованных нами базитовых тел Уджинского поднятия равен 800-825 млн. лет (U-Pb) (данные «МФ ВСЕГЕИ»).

В 2017 году была проведена лабораторная обработка отобранных коллекций. В частности, были проведены магнитная чистка и петромагнитные исследования пород Уджинского, Оленекского и Хараулахского поднятий. Комплекс петромагнитных исследований включал в себя исследования зависимости магнитной восприимчивости от температуры, а также намагниченности от температуры и выполнялся для установления основных минералов – носителей намагниченности. Для магматических пород применялось исследование анизотропии магнитной восприимчивости, направленное на установление морфологии изучаемых тел, а также на определение степени вторичных изменений магнитной структуры породы.

Таблица 10.1.

Направления намагниченности и палеомагнитные полюса изученных мезо-неопротерозойских пород Уджинского и Оленекского поднятий.

Метод осреднения	N	Dec °	Inc°	K	α_{95}°	Plat°	Plong°	Dp/Dm, A95°
Хайпахская свита (Оленекское поднятие) (Lat=71°, Long=124°)								
По образцам	35	239.6	-9.4	31.2	4.4	-14.2	62.2	4.4/2.2, 3.2
По сайтам	<u>4</u>	<u>240.1</u>	<u>-9.5</u>	<u>88.8</u>	<u>9.8</u>	<u>-13.9</u>	<u>61.1</u>	<u>9.9/5.0, 6.5</u>
Уджинская свита (Уджинское поднятие) (Lat=70.8°, Long=117°)								
По образцам	<u>33</u>	<u>229.6</u>	<u>5</u>	<u>15.3</u>	<u>6.6</u>	<u>-9.9</u>	<u>66.4</u>	<u>6.6/3.3, 4.7</u>
По сайтам	2	227.8	2.5	-	-			
Унгуохтахская свита (Уджинское поднятие) (Lat=70.9°, Long=116.9°)								
По образцам	<u>36</u>	<u>219.7</u>	<u>-29.5</u>	<u>17.6</u>	<u>5.9</u>	<u>-30</u>	<u>71.7</u>	<u>6.5/3.6, 4.8</u>
По сайтам	3	222	-32	63.6	15.6			
Первое магматическое событие. Дайки и силлы. (Lat=70.8°, Long=117)								
NE полярность	7	197.4	-33.5	42.2	9.4			
NE	7	220.9	-37.4	33.4	10.6			
SW	8	37.4	-29.5	30.4	10.2			
SW+NE	21	209.1	-38.3	14.6	8.6			
Среднее направление								
<u>2NE+3SW</u> по образцам	<u>42</u>	<u>207</u>	<u>-25.9</u>	<u>21.5</u>	<u>4.9</u>	<u>-30.3</u>	<u>86.3</u>	<u>5.3/2.9, 3.9</u>
Второе магматическое событие. Дайки и силлы. (Lat=70.8°, Long=117)								
SW	13	27.4	-22.8	50.3	5.9			
SW	7	29.1	10.8	79.7	6.8			
SW	4	20.5	-9.2	105	9			
Среднее направление								
<u>по образцам</u>	<u>25</u>	<u>32.8</u>	<u>-22.8</u>	<u>28.4</u>	<u>5.5</u>	<u>4.2 (-4.2)</u>	<u>64.9 (84.9)</u>	<u>5.8/3.1, 4.3</u>

Магнитные чистки изучаемых образцов проводились по стандартной методике [Храмов, 1982] и были направлены на установление направления намагниченности в изучаемых породах с последующим его пересчетом в координаты палеомагнитного полюса.

Результаты

В ходе проведенных лабораторных исследований были получены палеомагнитные полюса для нео- и мезопротерозойских пород Уджинского и Оленекского поднятий (Табл. 10.1.).

В результате проведенных магнитных чисток в породах Хайпахской и Уджинской свит была выделена высокотемпературная компонента намагниченности в интервале температур 510-700°. Подобный спектр блокирующих температур, вкуче с данными термомагнитного анализа свидетельствуют о том, что основные магнитные минералы изучаемых свит – это магнетит (возможно низкотитанистый титаномagnetит) и гематит (в основном). Также в результате компонентного анализа в породах Уджинской свиты, помимо вязкой современной компоненты было выделено несколько метакронных компонент в интервале температур 150-510°, однако на данный момент наверняка связать их с каким-либо перемагничивающим событием невозможно.

Результаты магнитной чистки пород Унгуохтахской свиты показали наличие одной стабильно высокотемпературной биполярной компоненты (реже, осложненной наличием современной вязкой компоненты), выделяемой в интервале температур 600-650°. В туфах Унгуохтахской свиты встречаются также образцы с двумя и тремя компонентами, однако направление высокотемпературной компоненты – совпадает с таким же в алевролитах.

В магматических телах Уджинского поднятия в результате проведенных магнитной чистки и компонентного анализа была выделена высокотемпера-

турная компонента намагниченности в температурном интервале 500-600°, общем для всех изученных базитовых тел. Однако, несмотря на проявления пермо-триасового магматизма на территории Уджинского поднятия, практически не заметно наложения триасовой компоненты. И в докембрийских магматических породах выделяется лишь одна стабильная высокотемпературная компонента, иногда осложненная вязкой современной вторичной компонентой.

В породах Хараулахского поднятия выделены характеристические (наиболее стабильные, идущие в ноль) компоненты намагниченности, однако во всех свитах направление этих компонент схоже. Полюсы, рассчитанные с данных направлений близки к ожидаемому меловому полюсу, связанному с перемагничиванием пород во время мелового орогенеза.

Обсуждение результатов

Полученные нами данные наращивают сегмент ТКМП Сибири для возраста ~1050-950 млн. лет и задают общий восточный тренд продолжения данного сегмента ТКМП до возраста ~800 млн. лет (Рис. 10.1.), что поддерживает версию, опубликованную в работах [Shatsillo et al., 2006; Павлов и др., 2015].

Более того, на основе палеомагнитных данных был ограничен возраст Унгуохтахской свиты и некоторых магматических тел Уджинского поднятия. На основе палеомагнитных данных было показано, что направление намагниченности в изученных магматических телах Уджинского поднятия делится на две группы. Подобное разделение по палеомагнитным данным совпадает с разделением изученных тел на две разные группы по геохимическим признакам [Гладкочуб и др., 2008], что свидетельствует о том, что на территории Уджинского поднятия представлено 2 этапа докембрийского магматизма Сибири. Полюс, рассчитанный с направления намагниченности в первой группе тел близок к палеомагнитному полюсу Унгуохтахской свиты, а также к полюсам, полученным по магматическим телам Анабарского поднятия возраста

~1500 млн. лет. Таким образом, на основании совпадения полученных нами палеомагнитных полюсов изученных геологических объектов с палеомагнитными полюсами, полученными по датированным изотопным методом (U-Pb) магматическим телам Анабарского щита [Evans et al., 2016] (Рис. 10.1.) можно сделать вывод о том, что Унгуохтахская свита и группа магматических тел Уджинского поднятия сформировались ~1500 млн. лет назад. Также, еще одним результатом нашего исследования является доказательство практически одновременного накопления верхнерифейских (~820-950 млн. лет) осадочных толщ Оленекского и Уджинского поднятий. Данный вывод сделан на основе совпадения полученных палеомагнитных полюсов для Уджинской и Хайпахской свит вышеобозначенных поднятий (Рис. 10.1.).

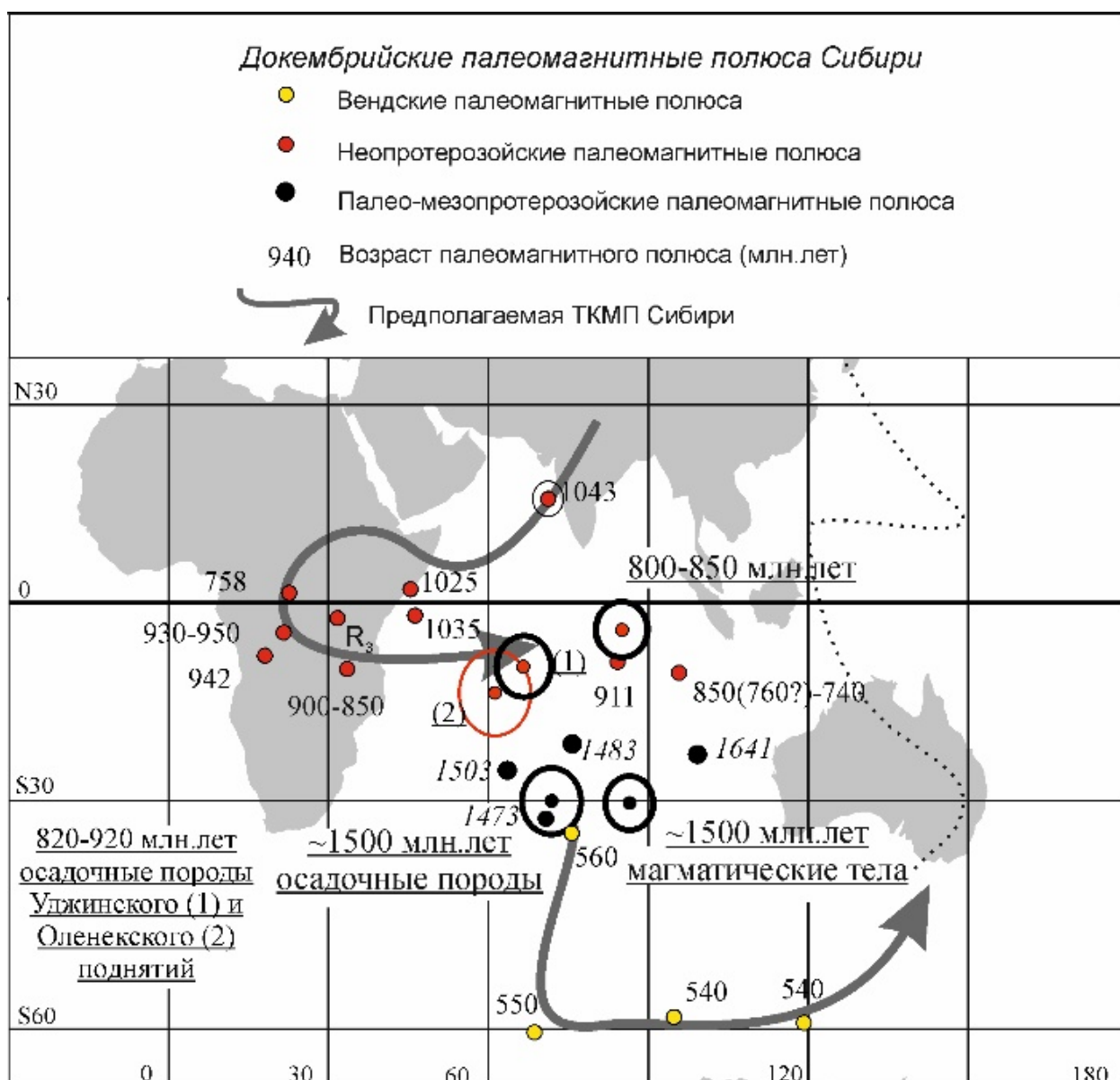


Рис. 10.1. Докембрийские палеомагнитные полюсы Сибирской платформы, с полученными нами мезо-неопротерозойскими палеомагнитными полюсами и с предлагаемым вариантом тренда ТКМП Сибири для неопротерозоя.

Выводы

В результате полученных нами новых палеомагнитных определений на неопротерозойский сегмент ТКМП Сибири было показано, что во временной промежуток ~920-800 млн. лет Сибирская платформа испытала перемещение

из экваториальных широт примерно на 15° в северном направлении и располагалась в приэкваториальных широтах. При этом, был осуществлен поворот на $\sim 5^\circ$ по часовой стрелке (Рис. 10.2.).

Реконструкция широтного положения Сибири в мезо-неопротерозое

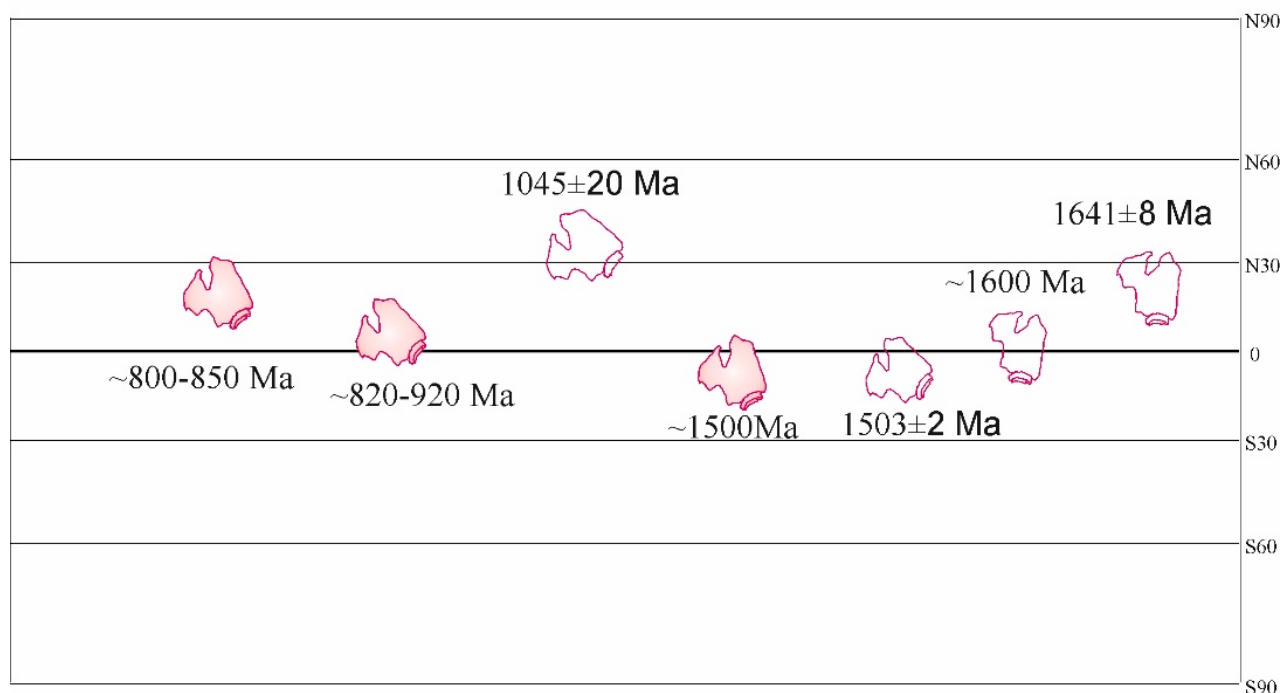


Рис. 10.2. Палеоширотная реконструкция положения Сибирской платформы в докембрии. Залитый контур Сибирской платформа – данные полученные в результате настоящего исследования. Незалитые контуры Сибирской платформы – результаты предшественников.

Задача 1.11. Ревизия положения западной границы СП на основе комплексного анализа палеомагнитных, геохронологических, седиментологических, хемо- и биостратиграфических данных.

Актуальность исследований

Вплоть до настоящего времени западную границу Сибирской платформы (СП) проводят либо:

(1) по так называемой Приенисейской тектонической зоне, намечаемой в районе западной периферии Енисейского кряжа (ЕК) [Лиханов и др., 2014 и ссылки там] и пространственно фактически совпадающей с долиной р. Енисей;

(2) по так называемой Татарско-Ишимбинской тектонической зоне, разграничивающей в пределах северной (Заангарской) части ЕК (Заангарья) Восточно-Ангарский блок (ВAB), сложенный позднедокембрийскими глинисто-терригенными и карбонатными позднерифейскими породами, от Центрально-Ангарского блока (ЦAB), в строении которого широко представлены метаморфические позднедокембрийские комплексы и позднерифейские гранитоиды [Верниковский и др., 2016 и ссылки там].

Так или иначе, но в большинстве работ Заангарье интерпретируется как реликт неопротерозойского аккреционно-коллизийного складчатого пояса, сформированного на западной окраине Сибирской платформы. Однако разные исследователи региона существенно по-разному интерпретируют строение Заангарья и реконструируют его позднедокембрийскую и раннепалеозойскую эволюцию. Основные различия заключаются в подходе к пониманию роли и значения тектономагматических событий, одновозрастных гренвильскому (свеконорвежскому) орогенезу, проявленному во многих регионах мира. Так, в одних работах обосновывается выделение гренвильских тектономагматических событий в истории Заангарья [Лиханов и др., 2014 и ссылки там]. В противоположность этому, в других работах проявление гренвильских тектономагматических событий в Заангарье полностью отрицается [Верниковский и

др., 2016 и ссылки там].

В строении Заангарья, кроме упомянутых выше ВАБ и ЦАБ, выделяют еще Исаковский блок. В его строении заметную роль играют позднерифейские офиолиты и образования, считающиеся надсубдукционными [Верниковский и др., 2016; Лиханов и др., 2010, 2014; Kuzmichev, Sklyarov, 2016 и ссылки там].

В большинстве работ ВАБ трактуется как фрагмент позднедокембрийской пассивной окраины Сибири [Верниковский и др., 2016; Лиханов и др., 2014 и ссылки там].

В отношении ЦАБ существуют два различных подхода к пониманию его тектонической природы и первичной тектонической принадлежности. Так, в некоторых работах ЦАБ – это (как и ВАБ) элемент позднедокембрийской окраины Сибири [Лиханов и др., 2010, 2012, 2014 и ссылки там]. При этом верхнедокембрийские толщи ЦАБ и ВАБ существенно не различаются [Хоментовский, 2007], за исключением того, что на западе ЦАБ верхи верхнего рифея представлены вулканогенными и вулканогенно-осадочными образованиями (иончихинская свита каитьбинской серии) [Ножкин и др., 2012]. При этом Татарско-Ишимбинская зона (пограничная структура между ЦАБ и ВАБ) трактуется как реликт среднерифейского Рыбинско-Панимбинского вулканического пояса, сформированного при рифтогенезе окраины Сибири.

В противоположность этому в работах других авторов [Верниковский и др., 2016 и ссылки там] ЦАБ рассматривается как чужеродный по отношению к сопряженному с ним в современной структуре краю СП террейн. При этом Татарско-Ишимбинская зона – офиолитовая сутура, по которой в конце позднего рифея (на временном рубеже ~ 700-600 млн лет) на комплексы и структуры пассивной окраины Сибирской платформы (ВАБ) были шарьированы комплексы и структуры ЦАБ – террейна, чужеродного по отношению к краю СП. Аккремирование ЦАБ к краю СП привело к тому, что ее пассивная континентальная окраина трансформировалась в активную. После этого в пределах той

части СП, 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 тем, что слэб, погружающийся под континент достиг астеносферы и «заработал» новый щелочной магматический источник. Проявления этого щелочного магматизма (с возрастом ~700-650 млн лет) отмечается вдоль всего Енисейского кряжа и Восточного Саяна до оз. Байкал [Ярмолук и др., 2005] и сопровождали формирование окраинно-континентальных рифтогенных прогибов [Sovetov et al., 2007]. К ним относится и Чапско-Тейский прогиб, реликты которого расположены на северо-востоке Заангарья. При этом в некоторых работах выполнение этого прогиба (чингасанская и чапская серии, возраст которых считается позднерифейским [Хоментовский, 2007; Ножкин и др., 2007] и вендским [Советов, Благовидов, 2005]), трактуется как моласса неопротерозойского орогена Енисейского кряжа [Хераскова и др., 2009].

Очевидно, что оба этих подхода, являясь по существу взаимоисключающими, не учитывают новейшие регионально-геологические и геофизические данные по Заангарью и, в особенности, по прилегающим к нему с запада частям Западно-Сибирской плиты. И действительно, результаты исследований по проекту «ВОСТОК», который включал глубокое бурение и сейсморазведочные работы, однозначно свидетельствуют о том, что фундамент юго-восточной части Западно-Сибирской плиты является глубокопогруженным фрагментом СП. Из этого следует, что западную границу СП следует проводить не по Татарско-Ишимбинской или Приенисейской тектоническим зонам, а существенно (на несколько сотен километров) западнее, под мезозойско-кайнозойским чехлом Западно-Сибирской плиты.

Основная цель исследований в 2017 г

Цель нашего исследования – разработка и надежное обоснование адекватной внутренне непротиворечивой, учитывающей всю совокупность имеющихся и новых геолого-геофизических (геологических, стратиграфических, магнитостратиграфических, седиментологических, геохимических, геохронологических, изотопно-геохимических, палеомагнитных, буровых и сейсморазведочных) данных, модели тектонического развития западной окраины СП и сопредельных структур Центрально-Азиатского покровно-складчатого пояса (ЦАПСП). Для этого в 2017 г. было продолжена разработка представлений о характере границы между ВАБ и ЦАБ Заангарья и корреляция верхнедокембрийских толщ, распространенных по обе стороны от этой границы, а также обоснование возраста и формационной принадлежности комплексов, считающихся молассами неопротерозойского орогена Енисейского кряжа. Кроме того, была продолжена работа по сбору, систематизации и анализу результатов геолого-геофизических исследований в прилегающей к ЕК восточной части Западно-Сибирской плиты с акцентом на материалы по верхнему докембрию и нижнему палеозою, а также по созданию численной модели бассейновой эволюции этого региона в позднем докембрии и фанерозое.

Основным объектом исследований были позднедокембрийские и кембрийские комплексы Заангарской части ЕК и сложенные ими структуры, а также позднедокембрийские и нижнепалеозойские комплексы, а также комплексы и структуры доюрского основания прилегающей к ЕК восточной части Западно-Сибирской плиты.

Для достижения основной цели исследований в 2017 г. и решения вытекающих из этого **основных научных задач** проводились следующие исследования:

1. Полевые экспедиционные работы на северо-востоке Заангарья. Цель

этих исследований:

(1) сбор полевых (палеомагнитных, стратиграфических, седиментологических структурно-геологических и т.п.) материалов для проведения сопоставления (корреляции) стратифицированных комплексов ВАБ, ЦАБ и Исаковской зоны (блока/террейна);

(2) определение возраста и формационной принадлежности комплексов, считающихся молассами неопротерозойского орогена Енисейского кряжа;

(3) определение возраста и природы (происхождения) диамиктитов, распространенных в исключительно труднодоступных и плохо изученных районах верхнего течения р. Вороговка;

(4) поиск объектов для палеомагнитных и магнитостратиграфических исследований и отбор пилотных (пробных) палеомагнитных коллекций из объектов, перспективных для получения палеомагнитных и магнитостратиграфических данных.

(5) отбор специализированных проб из обломочных пород для изучения детритных цирконов.

2. Лабораторная обработка палеомагнитных коллекций, отобранных в 2016 г.;

3. Сравнительный анализ получаемых палеомагнитных результатов с результатами наших предшествующих палеомагнитных исследований и палеомагнитных исследований других научных групп;

4. Обработка результатов U/Pb-изотопного датирования детритных цирконов из разрезов погорюйской свиты и подготовка соответствующей статьи;

5. Пробоподготовка специализированных проб из обломочных пород для изучения детритных цирконов и их выделение. Изготовление препаратов для проведения U/Pb-изотопного датирования детритных цирконов.

6. Сбор, систематизация и анализ результатов геолого-геофизических исследований в прилегающей к ЕК восточной части Западно-Сибирской плиты с акцентом на материалы по верхнему докембрию и нижнему палеозою, а также

создание на этой основе численной модели бассейновой эволюции этого региона (который мы считаем глубокопогруженной частью СП) в позднем докембрии и фанерозое.

При проведении исследований по задаче 1.11 Проекта были использованы следующие *методы и подходы*.

1. Палеомагнитные и магнито-стратиграфические исследования, включающие:

1.1. Детальный отбор специализированных палеомагнитных коллекций – серий ориентированных образцов для палеомагнитных исследований;

1.2. Пошаговое размагничивание образцов – детальная многоступенчатая температурная магнитная чистка;

1.3. Компонентный анализ результатов многоступенчатой температурной магнитной чистки;

2. Биостратиграфическое изучение вендско(неопротерозойско)-кембрийского переходного уровня, включая целенаправленную работу по обнаружению остатков метазоа и ихнофоссилий;

3. Седиментологическое изучение некоторых верхнедокембрийских и нижнепалеозойских толщ северо-восточной части Заангарья. В частности, проведен целенаправленный поиск признаков, необходимых для доказательства гляциогенного (ледникового или водно-ледникового – тиллитового или аква-тиллитового) происхождения диамиктитов, распространенных в районе верхнего течения р. Вороговка;

4. Литолого-геохимическое (в том числе изотопно-геохимическое) изучение некоторых верхнедокембрийских и нижнепалеозойских толщ северо-восточной части Заангарья, включая карбонатные стратиграфические последовательности вороговской серии и лебяжинской свиты;

5. Геохронологическое и изотопно-геохимическое изучение детритных цирконов из верхнедокембрийских и нижнепалеозойских толщ Заангарья,

включая:

- 5.1. отбор специализированных проб на детритные цирконы;
- 5.2. специализированная обработка проб и выделение детритных цирконов;
- 5.3. изготовление аналитических препаратов (эпоксидных шашек) для U/Pb-изотопного датирования и других видов исследования детритных цирконов;
- 5.4. получение катодолюминесцентных изображений (Cathode-Luminescent Image – CLI) отдельных зерен;
- 5.5. анализ CLI и подготовка к изучению U/Pb-изотопной системы детритных цирконов;

6. Структурно-геологическое изучение позднедокембрийских и нижнепалеозойских комплексов северо-востока Заангарья, включая:

6.1. измерение параметров пространственной ориентировки (азимутов простирания и падения, углов падения), плоскостных (слоистость, сланцеватость, кливаж, осевые поверхности складок, трещины и т.п.) и линейных (шарниры складок, минеральная и деформационная линейность, линейность пересечения слоистости и сланцеватости/кливажа и т.п.) мезоструктурных элементов;

6.2. кинематический анализ результатов структурных исследований.

7. Численное компьютерное 2-D бассейновое моделирование прилегающей к ЕК восточной части Западно-Сибирской плиты, которую мы считаем глубокопогруженной западной частью СП.

8. 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.

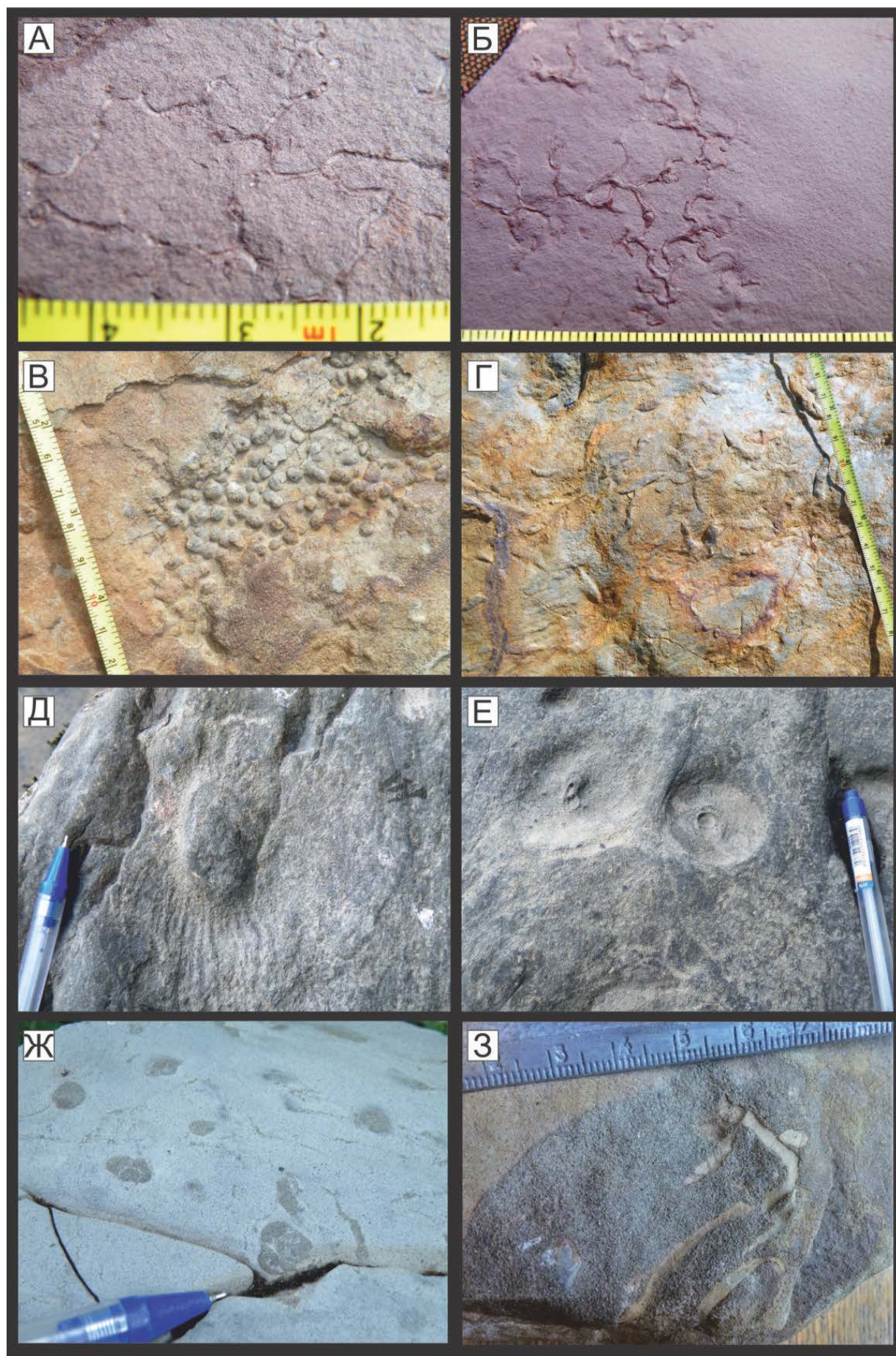
Основные результаты исследований, проведенных в 2017 г. в тезисной форме, сводятся к следующему:

1. На основе новых палеомагнитных данных, полученных по поздне-неопротерозойским – раннекембрийским породам Енисейского Кряжа (чинганская и чапская серии) и опубликованным данным [Shatsillo et al., 2006; Шацилло и др., 2015] выполнена палеомагнитная корреляция разрезов севера и юга Енисейского Кряжа и Бирюсинского Присянья (Рис. 11.1.). Полученные результаты указывают на очень специфическое поведение геомагнитного поля в позднем неопротерозое – раннем кембрии. Особенности палеомагнитной записи, указывают на то, что геомагнитное поле в то время могло существенно отличаться от поля центрального осевого диполя.



Рис. 11.1. Схема, иллюстрирующая пространственное положение рассчитанных палеомагнитных полюсов позднего неопротерозоя – раннего кембрия Енисейского Кряжа и Бирюсинского Присянья.

2. В ходе полевых работ в пределах Енисейского Кряжа и Присяянья сделаны многочисленные палеонтологические находки, имеющие важное значение для разработки стратиграфических схем позднего докембрия юго-запада Сибирской платформы [Кузнецов и др., 2017]. Эти находки (остатки метазоа и ихнофоссилии) сделаны в лопатинской (Рис. 11.2., А, Б) и карьерной (Рис. 11.2., В, Г) свитах чингасанской серии; мутнинской свите (Рис. 11.2., Д, Е, Ж,) вороговской серии; подъемской свите чапской серии (Рис. 11.2., И, К); лебяжинской свите (Рис. 11.2., Л, М); пограничных уровнях мошаковской и островной свит (Рис. 11.2., Т, Р) Енисейского Кряжа, а также в пограничных уровнях мотской и иркутской свит Присяянья (Рис. 11.2., Н, О).



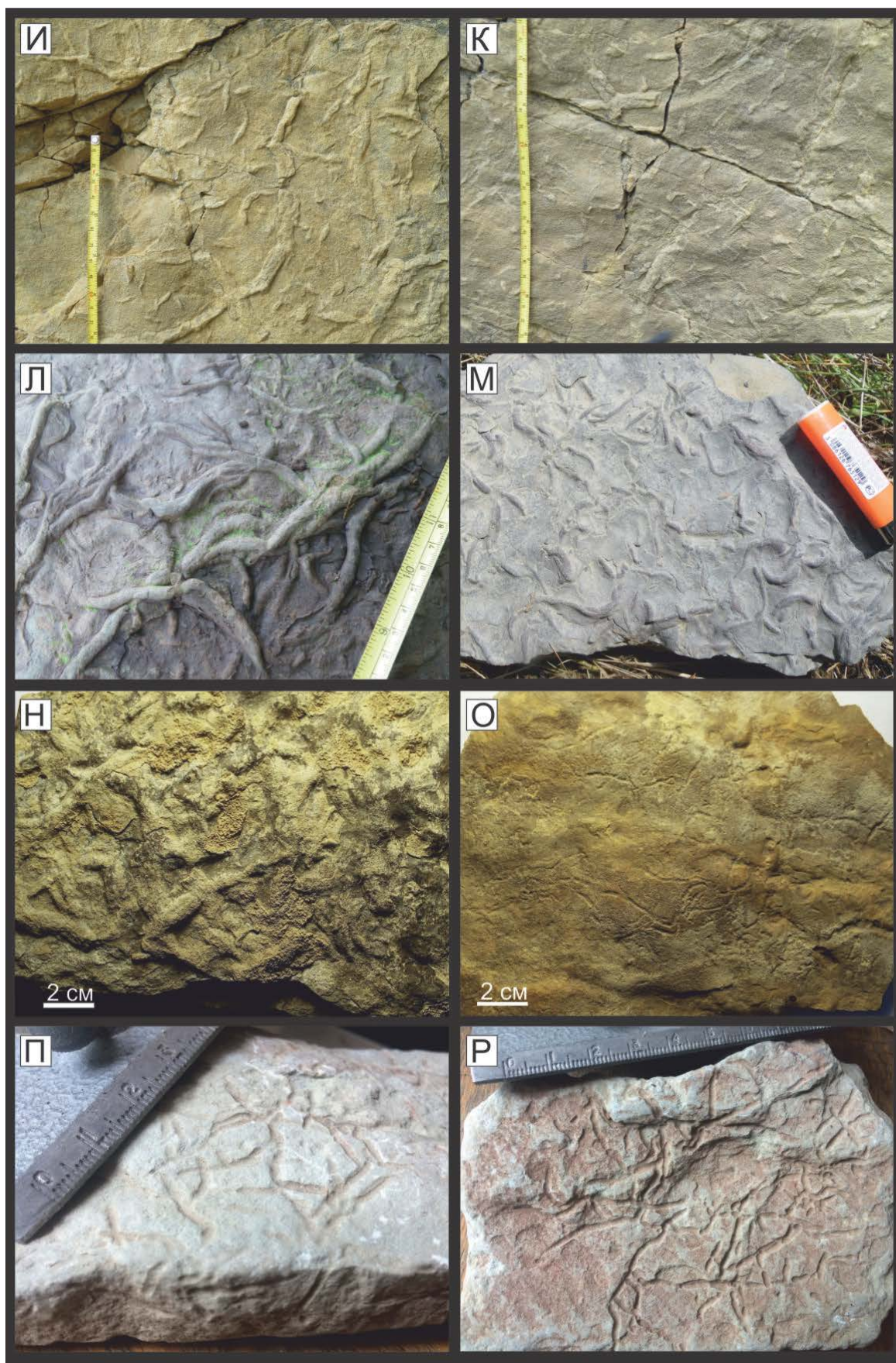


Рис. 11.2. Ихнофоссилии пограничных уровней венда/кембрия на западе СП.

Сделанные находки позволяют ограничить время формирования перечисленных стратиграфических единиц узким интервалом – концом эдиакария – началом кембрия и дают основание полагать, что перечисленные стратиграфические подразделения, относимые к неопротерозою, образуют не вертикальные последовательности, а латеральные ряды.

3. Достоверно установлена гляциальная природа неопротерозойских диамиктитов верхнего течения р.Вороговка (северо-запад Енисейского Кряжа) [Рудько и др., 2017], природа которых была предметом дискуссии уже 90 лет. На основе комплекса структурно-геологических наблюдений сделан вывод, что ледниковые отложения должны быть моложе средней части позднего рифея и древнее раннего кембрия и вероятно соответствуют глобальному оледенению Репитен (~725 млн. лет). Для определения изотопного возраста ледниковых отложений взяты геохронологические пробы из туфогенных прослоев и вулканические бомбы.

4. Получены новые данные по U-Pb возрастам и Lu-Hf систематике детритовых цирконов из песчаников погорюйской и лопатинской свит Енисейского Кряжа. Полученные результаты позволяют оценить нижний возрастной предел накопления погорюйской свиты как ~1.15 млрд. лет и оценить возраст и положение источников сноса, среди которых, помимо раннедокембрийских комплексов фундамента Сибири отмечены мезопротерозойские «не сибирские» источники. В рамках существующих мезо-неопротерозойских реконструкций суперконтинента Родиния предложена палеогеографическая схема (Рис. 11.3.), в соответствии с которой мезопротерозойская кластика поступала в погорюйский бассейн седиментации (как и в мезопротерозойские бассейны Ю-В части Сибири - район Сете-Дабана) с гренвилльских комплексов Лаврентии, посредством берегового разноса вдоль южной окраины Сибири.

Результаты, полученные по лопатинской свите [Кузнецов и др., 2018], указывают на то, что слагающие ее толщи образовались, преимущественно, за счет размыва раннедокембрийских комплексов кристаллического фундамента Сибири. Полученные данные опровергают существующие представления о молассовой природе лопатинской свиты и ее генетической связи с неопротерозойскими аккреционно-коллизийными событиями на западе Енисейского Кряжа.

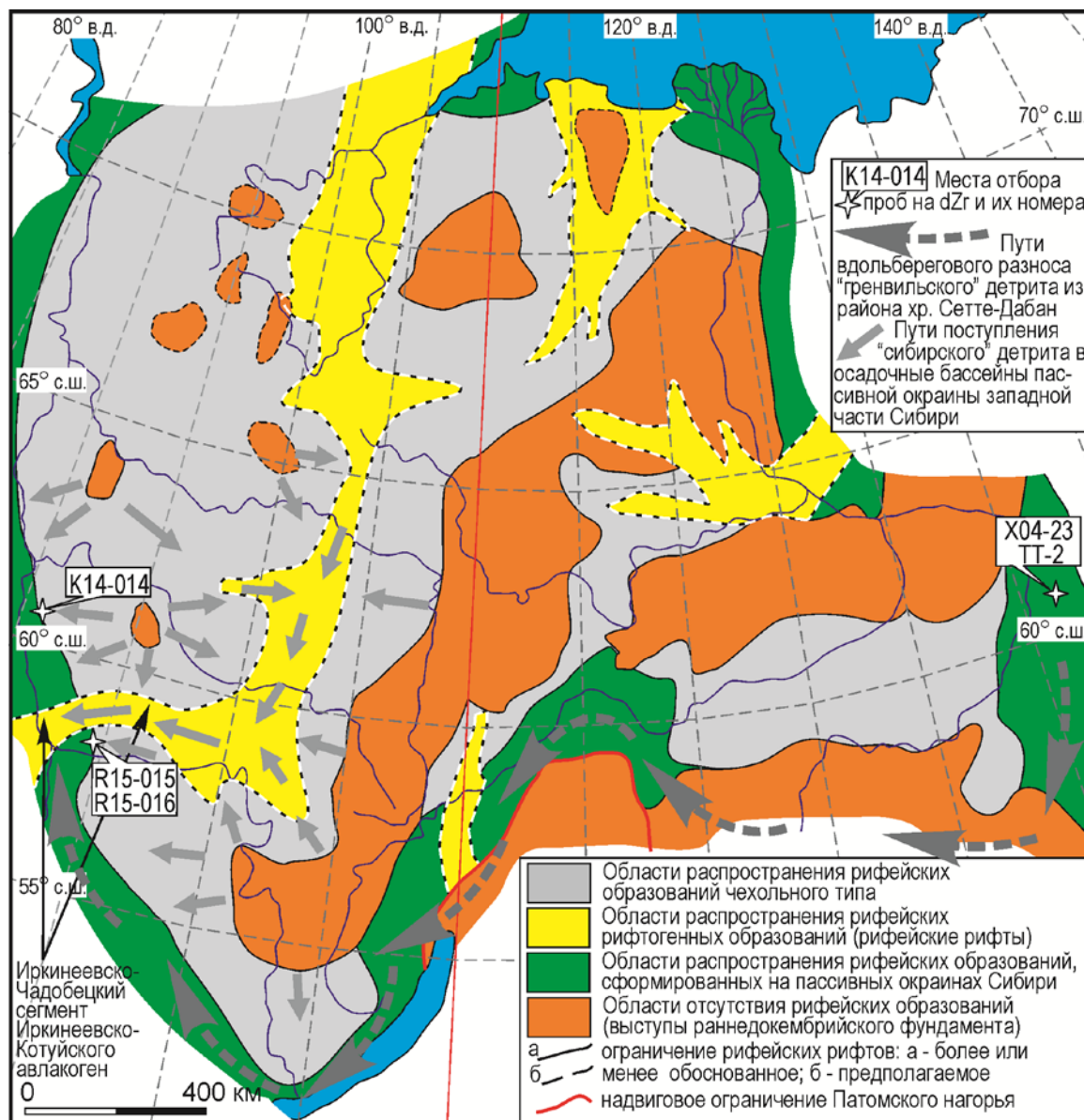


Рис. 11.3. Схема распространения рифейских пород в пределах Сибирской платформы под вендским несогласием. Схема составлена на основе [Кузнецов и др., 1997] и актуализирована авторами Отчета с использованием схем из работы [Филипцов, 2015].

5. На основе имеющейся геолого-геофизической информации [Kontorovich et al., 2011] выполнено численное 2-D моделирование эволюции восточной части Западно-Сибирской плиты (прилегающей к Енисейскому Кряжу) - определены основные этапы прогибания и осадконакопления, а также воздымания и эрозии. Результаты моделирования представлены в виде серии широтных палеопрофилей пересекающих Преденисейский бассейн. Результаты моделирования дают предпосылки для того, чтобы рассматривать область, расположенную на правом берегу Енисея, пространственно сопряженную с Заангарской частью Енисейского Кряжа, как глубоко погруженную крайнюю западную часть Сибирской платформы.

6. Итогом работ за отчетный период является комплексный тектонический и геодинамический анализ строения и истории тектонического развития западной части Сибирской платформы в конце докембрия и начале палеозоя. На этих результатах остановимся более подробно.

Проведенные исследования позволили получить результаты, на основе которых существующие представления об эволюции западного края Сибирской платформы (СП) в позднем докембрии и начале палеозоя могут быть существенно пересмотрены. Вместе с этим может быть пересмотрено и положение западной границы СП. И действительно, в связи с доминирующими представлениями в мезо- и неопротерозое вдоль западного ограничения СП развивались пассивные континентальные окраины. В позднем неопротерозое от Таймыра до Восточного Саяна формировались островодужные и офиолитовые ассоциации. Их возраст доказан многочисленными геохронологическими данными, полученными в разных российских и зарубежных лабораториях. В связи с этим, граница СП проводится вблизи полей развития этих обдуцированных на кратон комплексов, т.е. вдоль нынешнего положения р. Енисей, или даже по Татарско-

Ишимбинской тектонической зоне, разграничивающей в современной структуре Енисейский Кряж (ЕК) на Центрально-Ангарский и Восточно-Ангарский блоки.

Однако, западнее структур, сложенных неопротерозойскими островодужными комплексами и офиолитами (т.е. к западу от нынешнего положения р. Енисей), сейсмическими работами и бурением показано распространение докембрийских образований [Гражданкин и др., 2015, Конторович и др., 2012; Хераскова и др., 2009 и др.]. Эта часть западного обрамления современной СП в нефтяной геологии (при нефтегазогеологическом районировании) получила название – Преденисейский бассейн.

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 раннедокембрийские кристаллические образования, составляющие фундамент этой структуры платформенного типа.

Проведенные сбор, анализ и обобщение всей совокупности геолого-геофизической информации позволяют нам прийти к выводу, что мощная слоистая толща, залегающая между раннедокембрийскими кристаллическими образованиями фундамента и палеонтологически охарактеризованным вендом, представляет собой вещественный и стратиграфический эквивалент рифейских комплексов (толщ), распространенных на западе СП – в Байкитской антеклизе и в структурах ее обрамления. Кроме того, выше палеонтологически охарактеризованных вендских отложений, вскрытых скважиной Восток-3, залегает терригенно-карбонатный и карбонатно-эвапоритовый, а местами черносланцевый комплекс кембрийских пород [Конторович и др., 2012], аналогичных таковым, участвующим в строении платформенного чехла СП. Все это заставляет нас

признать, что западную границу СП следует проводить не вдоль нынешнего положения р. Енисей, а существенно (на 300-400 км) западнее – под мезозойско-кайнозойскими комплексами чехла Западной Сибири.

Таким образом, к западу от ЕК структуры фундамента и чехла (единый с СП верхневендско-нижнепалеозойский терригенно-карбонатный и карбонатно-эвапоритовый плитный комплекс) СП продолжают далеко на запад. Все это входит в очевидные противоречия с доминирующими представлениями о строении и эволюции западной периферии СП, представленной в современной структуре ЕК как реликт позднепротерозойского аккреционно-коллизийного сооружения. Сооружения, которое сочленяясь со структурами сопредельных частей ЦАПСИ сразу за долиной р. Енисей, погружается под мезозойско-кайнозойский чехол Западно-Сибирской эпипалеозойской плиты. Основываясь на этом понимании, мы провели компьютерное моделирование геологической эволюции Преденисейского бассейна. Результаты этого моделирования находятся в очень хорошем согласии с представлениями о том, что границу СП на широте Заангарской части ЕК следует проводить не вдоль нынешнего положения р. Енисей, и тем более не по Татарско-Ишимбинской зоне, а существенно западнее – на 300-400 км или на 400-500 км, соответственно. На это же указывает продолжение структур и сложенных ими комплексов платформенных (чехольных) толщ рифейского, вендского и кембрийского возраста в Преденисейский прогиб, расположенный на левобережье Енисея.

На правобережье р.Енисей расположен ЕК, в пределах которого на современном эрозионном срезе обнажены, в числе прочего, кристаллические комплексы неопротерозойского (позднерифейского и ранневендского) возраста. Большинство исследователей интерпретирует эти комплексы и сложенные ими структуры как реликты неопротерозойского аккреционно-коллизийного орогена ЕК [Верниковский др., 2016 и ссылки там]. Однако собранные нами и представленные в настоящем Отчете некоторые важные регионально-геологические

факты не позволяют признать существование неопротерозойского аккреционно-коллизионного орогена, реликты которого распознаются в современной структуре ЕК, в его современном или близком к современному пространственном положении. Это, в частности, отсутствие на ЕК и в сопредельных частях СП синорогенных обломочных формаций этого орогена (комплексы, которые традиционно считались его молассой в действительности, как показано нами, сложены продуктами эрозии архейско-раннепротерозойских комплексов кристаллического фундамента СП или продуктами размыва толщ, сложенных продуктами этих древних комплексов). Кроме того, комплексы и структуры фундамента и нижних уровней чехла СП прослежены далеко на запад – на левобережье Енисея, что не позволяет признать окраинно-континентальное положение (положение на окраине СП) аккреционно-коллизионного неопротерозойского орогена ЕК.

В настоящее время нам представляется возможным предложить и попытаться в дальнейшем рассмотреть и обосновать фактическими данными три сценария вовлечения неопротерозойских кристаллических (гранито-метаморфических) комплексов в современную структуру ЕК.

А. Это предположение высказывалось нами ранее и состоит в том, что неопротерозойские кристаллические комплексы (гранитометаморфические образования), распространенные сейчас на ЕК, представляют собой не аккреционно-коллизионные 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 чуть позднее, но тоже в неопротерозое в условиях транспрессии крупноамплитудные сдвиги также обусловили метаморфические преобразования пород –

развитие бластомилонитов по гранитам и вмещающим их породам. Такой способ формирования неопротерозойских гранитометаморфических комплексов Заангарской части ЕК согласуется с их внутриплатформенным положением. Однако отсутствие продуктов эрозии этих гранитометаморфических образований в поздневендских толщах, налегающих на структуры ЕК и обрамляющих их структур, накладывает существенные ограничения и на эти представления.

Б. Неопротерозойские кристаллические комплексы, участвующие в формирование покровно-складчатой структуры ЕК, сформированы в обстановках активных континентальных окраин и эпизодов аккреционного наращивания этими комплексами периферических зон континента. Однако, эти комплексы оказались вовлеченными в структуру ЕК позднее времени своего формирования по системе крупноамплитудных сдвигов. То есть эти комплексы сформировались в результате неопротерозойских аккреционных и/или коллизионных процессов, протекавших у другой части СП (или, что менее вероятно – другого континента). Позднее эти комплексы и сложенные ими палеоструктуры были смещены по системе сдвигов и «вдвинуты» в пределы западной части СП и оказались в своем современном структурном положении. Это «вдвигание» произошло 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.

В. Разнородные неопротерозойские кристаллические комплексы, участвующие в покровно-складчатом строении ЕК, сформированы в несколько этапов.

- На ранних этапах в западной части СП проявились обстановки растяжения (рифтогенные образования, в том числе вулканиты, ассоциирующие с тиллитами, распространенными в бассейне верхнего течения р. Вороговка, а также широко развитые в Заангарье массивы анарогенных гранитов А-типа).

- На последующей стадии процесс растяжения и рифтинга трансформировался в спрединг – образовался неширокий океанический бассейн, подобный, по-видимому, океаническому бассейну современного Бафинова пролива, разделяющего Северо-Американский кратон и Гренландский «микроконтинент» или современного Мозамбикского пролива, разделяющего Африканский «кратон» и Мадагаскарский «микроконтинент». В этом новообразованном неопротерозойском океаническом прогибе (назовем его – Исаковский микроокеан) образовались плагиограниты, габброиды и гипербазиты, слагающие офиолитовую ассоциацию Исаковского блока ЕК. Исковский микроокеан отделил от основной части СП ее крупный фрагмент – Преденисейский блок.

- В самом конце рифея и начале венда Исаковский микроокеан закрылся с образованием покровно-складчатой структуры, реликты которой представлены в строении современного ЕК. Эти тектонические процессы обусловили воздымание СП и её Преденисейского блока, деформирование и глубокую эрозию рифейских толщ нижних уровней чехла СП и её Преденисейского блока.

- В конце позднего венда начался новый этап – СП и повторно вовлеченный в её строение Преденисейский блок начали прогибаться – продолжилось накопление платформенного чехла.

Планы на 2018 г

2.13. Ревизия положения западной границы Сибирской платформы (СП) на основе комплексного анализа палеомагнитных, геохронологических, седиментологических, хемо- и биостратиграфических данных.

В 2018 г планируется продолжить и в основном завершить разработку темы, связанной с определением и обоснованием пространственного положения западной границы Сибирской платформы на основе комплексного анализа палеомагнитных, геохронологических, седиментологических, хемо- и биостратиграфических данных.

Для этого нами запланировано проведение полевых экспедиционных исследований в нескольких районах на Енисейском Кряже. В частности – в бассейне р. Чапа – с целью создания основы для проведения сравнительного анализа тиллитов, распространенных в бассейне верхнего течения р. Вороговка и диамиктитов, выделяемых как чивидинская свита (верхний стратиграфический элемент чингасанской серии) и в бассейне р. Чапа.

Кроме этого, после обработки в зимне-весенний период 2018 г. пилотных палеомагнитных коллекций, собранных летом 2017 г., возможно, возникнет необходимость палеомагнитного доизучения следующих разрезов:

- (1) северореченской свиты вороговской серии (в нижнем широтном течении р. Вороговка);
- (2) разреза пестроцветных отложений, надстраивающих тиллитовый комплекс, верхнего течения р. Вороговка;
- (3) фрагментов разреза лебяжинской свиты в низовьях р. Исаковка
- (4) карбонатов лебяжинской (подъемской?) и красноцветов эвенкийской свиты верхнего течения р. Вороговка

В 2018 г. будет продолжен сбор и анализ структурно-геологической информации в районах проведения полевых экспедиционных работ, а также – продолжена и завершена обработка структурно-геологической информации,

собрانной нами на предшествующих этапах работ по Проекту. Будут продолжены седиментологические и хемотратиграфические исследования, а также работа по целенаправленному поиску и изучению инофоссилий и остатков биоты эдиакарского типа.

В итоге к концу 2018 года будет завершено тестирование описанных выше вероятных тектонических моделей и представлена актуализированная и детализированная модель геодинамической эволюции региона Енисейского Кряжа. Эта модель будет непротиворечиво интегрировать результаты изучения и интерпретации особенностей строения, характера взаимоотношений и пространственного распространения позднедокембрийских и кембрийских комплексов Заангарской части Енисейского кряжа, а также пространственно сопряженных с ним структур СП (включая ее Преденисейский блок), а также сопряженные с ними структуры ЦАПСП.

Задача 1.12. Палеомагнитное тестирование гипотезы Родинии для интервала времени 1050-1100 млн. лет.

Аннотация

В 2017 г. завершена интерпретация палеомагнитных данных, полученных в ходе исследований малгинской и тоттинской среднерифейских свит, отобранных из обнажений долины р. Белой, в пределах Горностахской антиклинали, расположенной на севере Учуро-Майского района (восток Сибирской платформы). При этом получены следующие основные результаты: 1. Тектонический блок, к которому принадлежит Горностахская антиклиналь Сетте-Дабана не испытал вращений при надвигании на Сибирскую платформу, следовательно, палеомагнитные полюсы Горностахской антиклинали могут быть отнесены ко всей Сибирской платформе; 2. Полученные палеомагнитные данные указывают на существенную диахронность границы тоттинской и малгинской свит в пределах Учуро-Майского региона; 3. В тоттинское время Сибирская платформа находилась в средних широтах северного полушария и была развернута на 115° относительно меридианной сетки по сравнению с современным ее положением; 4. Кривые КМП для Лаврентии и Сибири могут быть согласованы для интервала времени 1100-950 млн. лет, что может рассматриваться как сильный аргумент в пользу того, что на протяжении всего этого времени Сибирь и Лаврентия входили в состав единого суперконтинента (Родиния). При этом полученные данные подтверждают ранние результаты (Павлов и др., 2002), согласно которым югоюго-восточная окраина Сибири была обращена к северным территориям Лаврентии; 5. Минимизация расхождений кривых КМП Сибири и Лаврентии приводит к наличию между этими древними кратонами некоторого пространства, которое в составе суперконтинента Родиния могло быть занято неким третьим континентальным блоком (что согласуется с гипотезой [Pisarevsky and Natapov, 2003]).

Введение

Несмотря на высокую популярность гипотезы позднепротерозойского суперконтинента Родиния, внимательное рассмотрение имеющихся данных показывает, что на настоящий момент сам факт существования этого суперконтинента не может считаться окончательно установленным. Одним из ключевых вопросов для тестирования гипотезы Родинии является определение взаимного положения Сибири и Лаврентии в интервале времени, соответствующему периоду существования этого суперконтинента (1100 – 750).

На настоящий момент, фактически, имеется не так много данных, подтверждающих, что Сибирь в это время примыкала к Лаврентии и, таким образом, являлась частью Родинии. В пользу этого говорит некоторое довольно ограниченное число изотопно-геохронологических данных, обсуждается некоторое сходство сибирских и лаврентийских геологических структур и, наконец, показано, что имеющиеся кривые кажущейся миграции полюса для Сибири и для Лаврентии для части “родиниевского” интервала времени довольно хорошо согласуются друг с другом.

Вообще говоря, сравнение мезо-неопротерозойских участков кривых кажущейся миграции полюса (APWP) древних кратонных блоков, участвовавших, согласно [26, 22, 42] в строении суперконтинента Родиния, является важнейшим направлением тестирования этой гипотезы. В том случае, если рассматриваемые кратоны действительно являлись частями Родинии, их APWP времени 1100 - 750 Ма должны совпасть после совмещения их в той конфигурации, в которой они входили в состав суперконтинента.

В работах конца 1990х– начала 2000-х было показано согласованность сибирской и лаврентийской кривых APWP для интервала времени ~1040-950 млн. лет назад. Очевидно, что для дальнейшего тестирования гипотезы Родинии необходимо расширить временной интервал сравнения. Именно это и составляло главную цель настоящей работы.

При сравнении имеющихся кривых APWP было предложено две несколько различающихся реконструкции взаимного положения Сибири и Лаврентии.

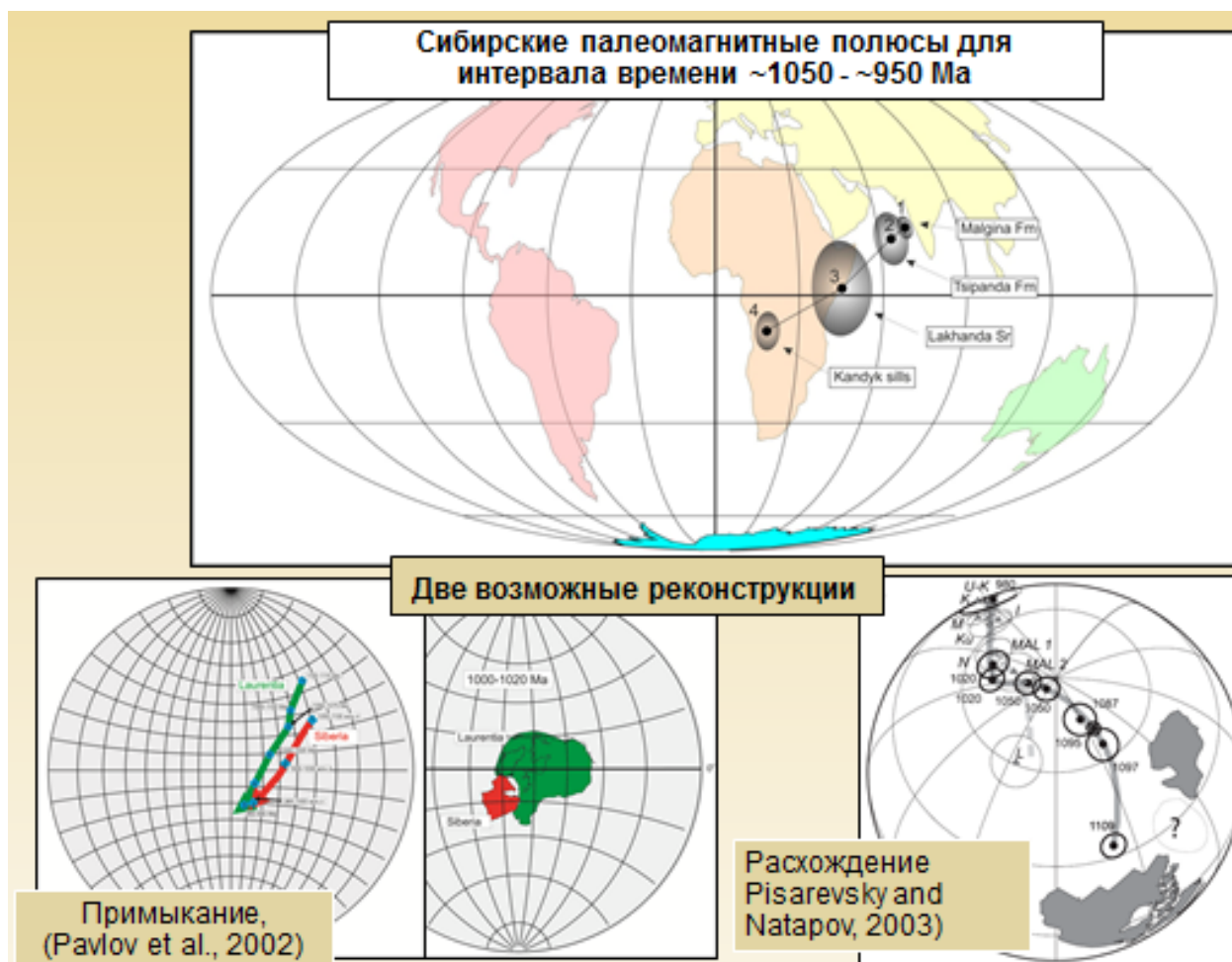


Рис. 12.1. Сверху - Сибирские палеомагнитные полюсы для интервала времени ~1050-950 млн. лет. Внизу – две возможные реконструкции взаимного положения Сибири и Лаврентии в “родиниевское” время.

Одна из них отвечала тесному примыканию континентов в конфигурации, показанной на рис., другая предполагала существования некоторого океанического пространства между ними (Рис. 12.1.). Получение новых данных для других временных уровней должно было помочь продвинуться и в разрешении этого противоречия. Для расширения временного интервала сравнения

сибирских и лаврентийский палеомагнитных полюсов, нами были изучены отложения тотгинской свиты Учуро-Майского района, чей возраст оценивается в настоящее время как ~1050-1100 млн. лет.

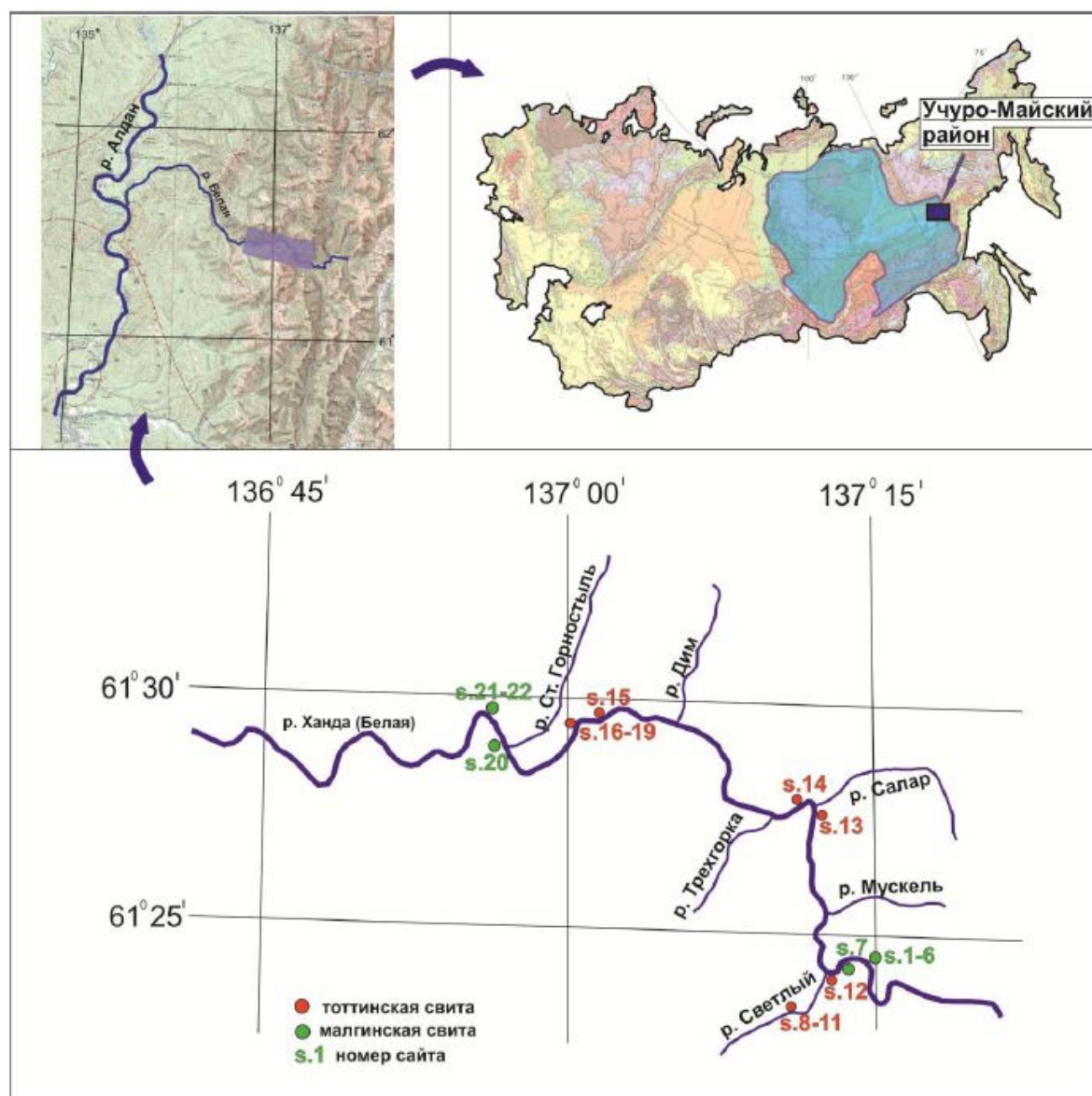


Рис. 12.2. Географическое положение Учуро-Майского района (вверху справа), изученного участка долины р. Белой (вверху слева) и положение изученных обнажений.

Эта свита подстилает отложения малгинской свиты, для палеомагнитный полюс которой до последнего времени являлся самым древним при сравнении сибирских и лаврентийских полюсов при тестировании гипотезы Родини. Данные, полученные нами при палеомагнитных исследованиях этой

свиты, а также прилегающих к ней частей рифейского Учуро-Майского разреза, представлены в настоящем отчете.

Объект исследований

В рамках настоящей работы был выполнен анализ лабораторных палеомагнитных данных, полученных нами в последние годы по тоттинской и малгинской свитам, керпыльской серии среднерифейского возраста, юго-восток Сибирской платформы). Образцы из этих свит (общим числом более 800) нами были отобраны из обнажений, расположенных в долине р. Белой в пределах Юдомо-Майской складчато-надвиговой зоны, расположенной на севере Учуро-Майского района (Рис. 12.2).

В опробованной части тоттинская свита представлена мелко- среднезернистыми красноцветными алевролитами и песчаниками, малгинская свита сложена известняками и глинистыми известняками красных, зеленоватых и палевых тонов. Изученные обнажения находятся в западном и в восточном крыльях Горностахской антиклинали.

Результаты

Первый вопрос, который должен был быть решен в ходе настоящего исследования состоял в выяснении возможности отнесения палеомагнитных полюсов, полученных по Горностахской антиклинали Юдомо-Майской зоны Учуро-Майского района ко всей Сибирской платформе. Этот вопрос мог быть решен путем сравнения одновозрастных палеомагнитных полюсов Горностахской антиклинали и собственно Сибирской платформы.

При изучении известняков малгинской свиты западного крыла Горностахской антиклинали, содержащих довольно простую и легко интерпретируемую палеомагнитную запись, нами была выделена характеристическая компонента намагниченности, по которой был рассчитан палеомагнитный полюс.

Этот полюс с высокой точностью совпал с палеомагнитным полюсом, полученным при изучении обнажений малгинской свиты из южных областей Учуро-Майского района, бесспорно относящимся к Сибирской платформе *sensu stricto*.



Рис. 12.3а. Обнажение тоттинской свиты восточного крыла Горностахской антиклинали.

Палеомагнитная запись в образцах малгинской свиты, отобранных на восточном фланге Горностахской антиклинали, более сложная. В отличие от малгинских пород западного фланга, содержащих в себе только две компоненты намагниченности, в породах малгинской свиты с восточного фланга, мы видим присутствие добавочной сильной компоненты намагниченности, образовавшейся, судя по ее направлению во время активных мезозойских тектонических движений, имевших место на территории современной Горностахской антиклинали.



Рис. 12.3б. Обнажение малгинской свиты восточного крыла Горностахской антиклинали.

В ряде случаев эта компонента “затирает” наиболее стабильную и, по-видимому, первичную компоненту намагниченности. Тем не менее, последнюю удастся выделить в довольно большом количестве образцов на интервалах, отвечающих весьма интенсивным режимам чистки. Эта компонента имеет биполярное распределение, близка по склонению к характеристической компоненте, выделенной в восточных обнажениях, однако обладает заметно большим наклоном. Это различие, мы связываем с диахронностью границы малгинской и тоттинской свиты, а также с тем, что малгинские отложения восточной части антиклинали древнее отложений той же свиты, обнажающихся на западе.

Тоттинские отложения восточного крыла Горностахской антиклинали за редким исключением не содержат интерпретируемый результат, зато палеомагнитная запись образцов тоттинской свиты западного крыла очень проста и легкоинтерпретируема. После удаления современной наложенной компоненты намагниченности в этих образцах остается только характеристическая первичная намагниченность, которая дает возможность рассчитать соответствующий палеомагнитный полюс для тоттинской свиты.

Обсуждение результатов

На основании полученных в данной работе палеомагнитных направлений были рассчитаны палеомагнитные полюса для малгинской и тоттинской свит.

Палеомагнитный полюс по западному крылу Горностахской антиклинали малгинской свиты Юдомо-Майской зоны, практически совпадает с малгинским полюсом, полученным ранее на Учуро-Майской плите, и дополняет палеомагнитную базу данных для позднего мезопротерозоя Сибири. Однако этим не исчерпывается его значение.

Полное соответствие этих полюсов дает убедительное доказательство того, что при тектонических деформациях, испытанных породами Горностахской антиклинали на протяжении их поздне- и пострифейской геологической истории, они не испытали сколько-нибудь значительных (превышающих пределы погрешности палеомагнитного метода) перемещений относительно Сибирской платформы. Соответственно, полученные по ним палеомагнитные полюсы могут быть отнесены ко всей Сибирской платформе.

Полученное же направление по малгинской свите восточного крыла Горностахской антиклинали, хотя и относительно близко, тем не менее, статистически значимо отличается от ожидаемого направления, пересчитанного на Горностахскую антиклиналь с малгинского полюса Учуро-Майской плиты. Практически совпадая по склонению, полученное нами здесь палеомагнитное

направление имеет существенно большие наклоны, не позволяя списать наблюдаемое различие на эффекты, связанные, например, с компакцией осадочных пород (занижение наклона).

На данном этапе исследований мы объясняем различие наблюдаемого и расчетного направления диахронностью границы малгинской и тоттинской свит в масштабах всего Учуро-Майского района. Другими словами, наша гипотеза состоит в том, что время образования низов малгинской свиты Горностахского блока отвечает времени формирования верхов тоттинской свиты Майской (Учуро-Майской) плиты. В пользу нашей гипотезы, отчасти, свидетельствует тот факт, что низы малгинской свиты Горностахской антиклинали в литологическом отношении заметно отличаются от низов малгинской свиты других районов региона.

В такой интерпретации палеомагнитный полюс малгинской свиты, полученный по восточному крылу Горностахской антиклинали, оказывается заметно более древним, чем по западному крылу, а палеомагнитный полюс, полученный по тоттинской свите, позволяет удревнить отрезок кривой КМП для Сибирской платформы в еще более глубокое прошлое. В результате, вместе с опубликованными ранее [Павлов, 2002] полюсами по усть-кирбинской, кандыкской, малгинской свитам и по лахандинской серии Учуро-Майской плиты, мы получаем последовательность полюсов (Рис. 12.4.), характеризующая дрейф Сибирской платформы в интервале времени 1100-950 млн. лет.

Согласно полученной последовательности полюсов Сибирь в тоттинское время находилась в средних широтах северного полушария и была развернута на 115 относительно меридианной сетки по сравнению с современным ее положением (Рис. 12.5.).

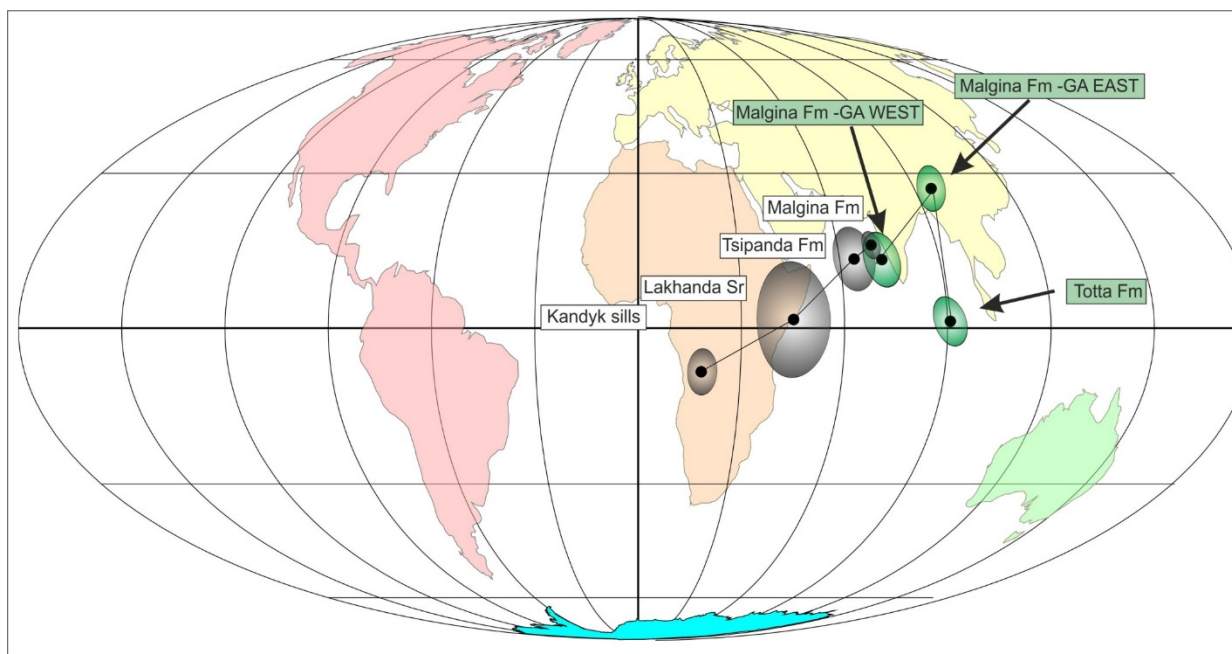


Рис. 12.4. Последовательность палеомагнитных полюсов Учуро-Майского района (Сибирской платформы). Зеленым цветом показаны полюсы, полученные в настоящей работе. Самый восточный полюс соответствует тоттинской свите и соответствует самой древней (~1050-1100 млн. лет) части кривой.

При этом район современной Горностахской антиклинали находился на 30 широте. Затем, испытывая небольшое вращение против часовой стрелки, Сибирь в малгинское время переместилась в более северные широты, а к усть-кирбинскому времени (950 млн. лет) оказалась в экваториальных широтах, развернутая на 30° относительно меридианной сетки по сравнению с современным ее положением.

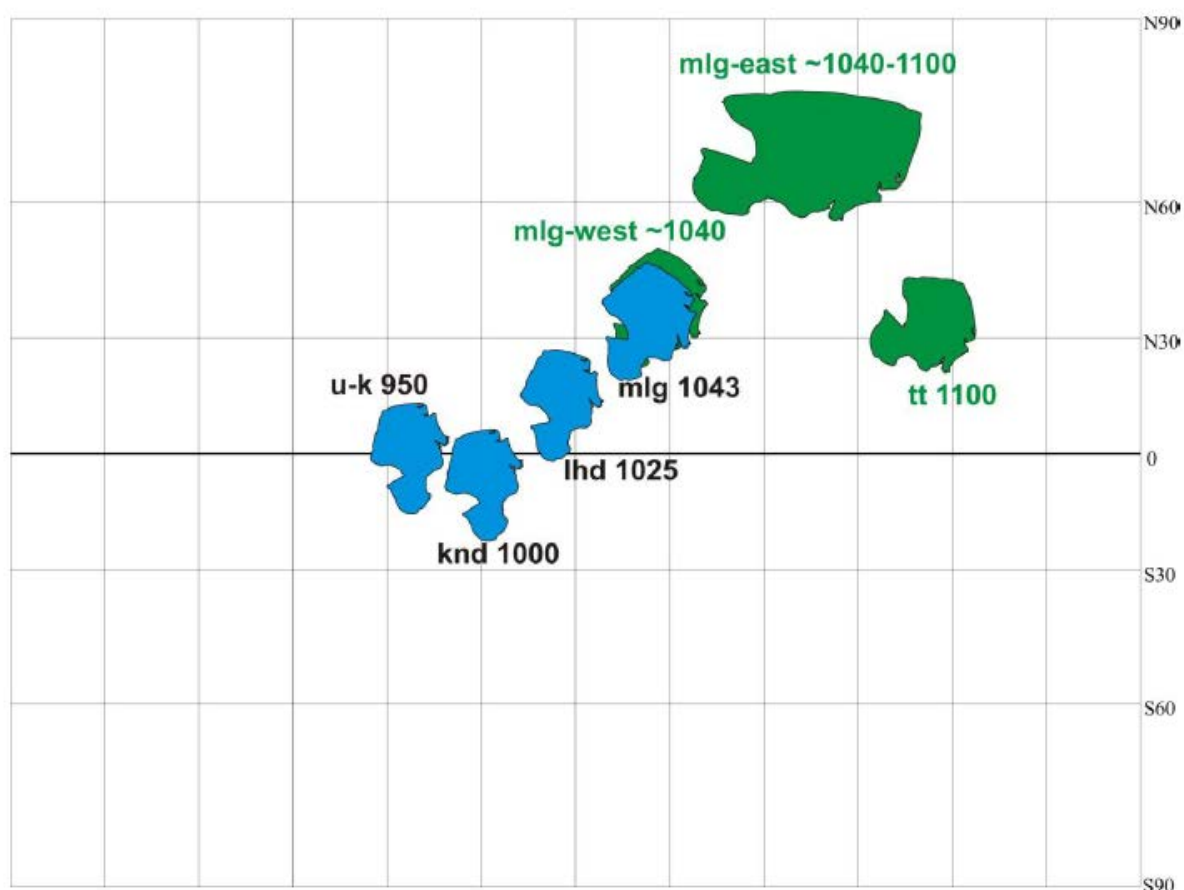


Рис. 12.5. Дрейф Сибирской платформы в интервале времени ~1100-950 млн. лет.

Как уже отмечалось выше, данные имевшиеся до настоящего исследования давали возможность сравнивать сибирскую и лаврентийскую кривые кажущейся миграции полюса для интервала времени ~950-1050 млн. лет. Полученные нами данные позволяют расширить временной интервал сравнения.

Анализ сибирской и лаврентийской последовательностей палеомагнитных полюсов показывает возможность их совмещения для интервала времени 1100-950 млн. лет (Рис. 12.6.). Прежде всего, отметим, что эти кривые допускают тесное совмещение соответствующих кратонов таким образом, как это предлагалось ранее в работе [Павлов и др., 2002]. При этом координаты эйлеровского полюса вращения и угол вращения (77° с.ш., 98° в.д., 137°), есте-

ственно, близки, хотя и несколько отличаются от координат эйлеровского полюса и соответствующего угла вращения, указанных в работе [Павлов и др., 2002] - 78° с.ш., 111° в.д., 148° .

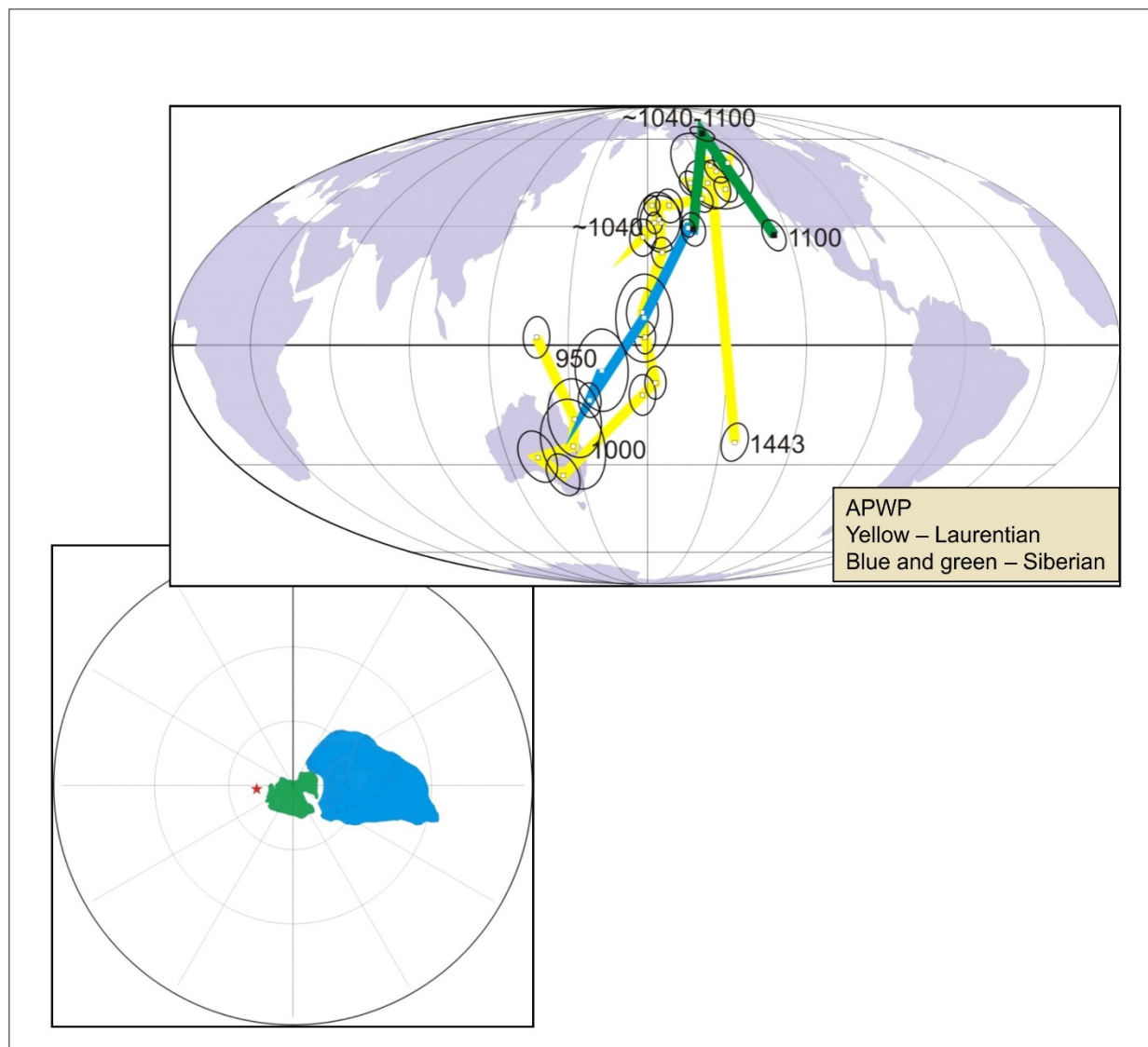


Рис. 12.6. Сравнение кривых кажущейся миграции Сибири и Лаврентии для интервала времени 1100-950 млн. лет и соответствующая реконструкция взаимного положения этих кратонов на протяжении этого временного интервала. Синим показана Лаврентия, зеленым – Сибирь, красным – эйлеровский полюс вращения, использованный при реконструкции.

Возможен, однако, и другой подход при восстановлении взаимного положения Сибири и Лаврентии в составе суперконтинента Родиния. Этот подход был использован (при близком наборе исходных данных) в работе [Pisarevsky and Natapov, 2003]. Суть этого подхода состояла в поиске такого варианта сопоставления кривых, при котором получается минимальное расхождение между полюсами одного возраста. В этом случае (стремясь достичь максимально хорошего совпадения кривых КМП) мы получаем принципиально ту же реконструкцию (эйлеровский полюс: 71° с.ш., 130° в.д., 122°), которая, однако, отличается от первой необходимостью иметь некоторое пространство между сибирской и лаврентийской континентальными массами (Рис. 12.7.).

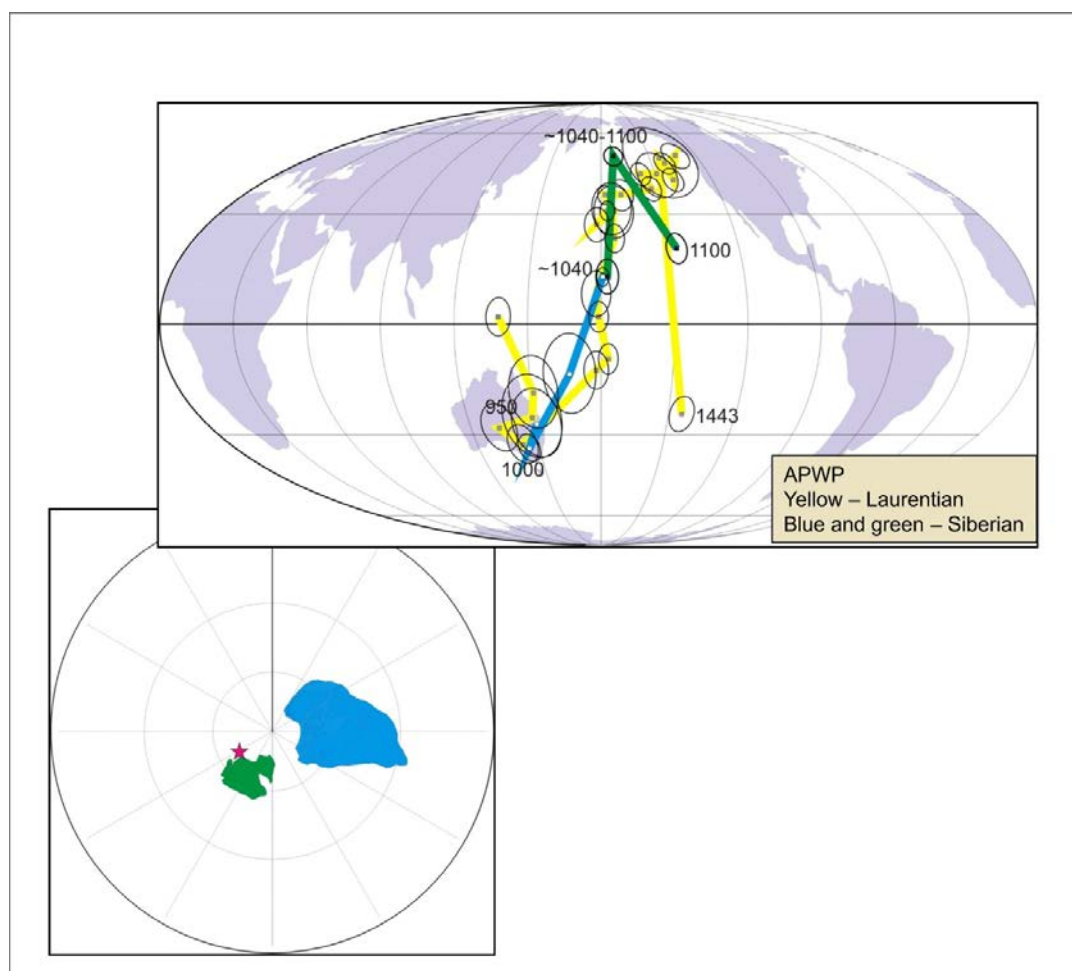


Рис. 12.7. Альтернативная возможность сопоставления сибирской и лаврентийских кривых кажущейся миграции полюса и соответствующая реконструкция. Обозначения как на рис. 12.6.

Это пространство в составе суперконтинента Родиния могло быть занято неким третьим континентальным блоком (что согласуется с гипотезой [Pisarevsky and Natapov, 2003]).

Как бы то ни было, наши данные существенно развивают доказательную базу существования суперконтинента Родиния, показывая, что, по крайней мере, на протяжении интервала 1100-950 млн. лет эти континенты с большой вероятностью являлись частями единой континентальной массы. При этом юго-юго-восточная часть Сибири была обращена северным территориям Лаврентии

Выводы

По итогам проведенных исследований можно сделать следующие основные выводы.

1. Тектонический блок, к которому принадлежит Горностахская антиклиналь Сетте-Дабана не испытал вращений при надвигании на Сибирскую платформу.
2. Палеомагнитные полюсы Горностахской антиклинали могут быть отнесены ко всей Сибирской платформе.
3. Полученные палеомагнитные данные указывают на существенную диахронность границы тоттинской и малгинской свит в пределах Учуро-Майского региона.
4. В пределах Горностахской антиклинали уверенно фиксируется метакронная компонента намагниченности, связанная, по-видимому, с мезозойской тектонической активизацией, в ходе которой, в частности, происходило масштабное надвигание пород Южно-Верхоянской области на восточную периферию Сибирской платформы.

5. В тоттинское время Сибирская платформа находилась в средних широтах северного полушария и была развернута на 115 относительно меридианной сетки по сравнению с современным ее положением.

6. Кривые КМП для Лаврентии и Сибири могут быть согласованы для интервала времени 1100-950 млн. лет, что может рассматриваться как сильный аргумент в пользу того, что на протяжении всего этого времени Сибирь и Лаврентия входили в состав единого суперконтинента (Родиния). При этом полученные данные подтверждают ранние результаты [Павлов и др., 2002], согласно которым югоюго-восточная окраина Сибири была обращена к северным территориям Лаврентии.

7. Минимизация расхождений кривых КМП Сибири и Лаврентии приводит к наличию между этими древними кратонами некоторого пространства, которое в составе суперконтинента Родиния могло быть занято неким третьим континентальным блоком (что согласуется с гипотезой [Pisarevsky and Natapov, 2003]).

Задача 1.13. Приобретение оборудования для научных исследований

Приобретение материалов и комплектующих для оборудования.

В 2017г. для реализации задач проекта было закуплено оборудование:

1) Источник питания APS-7151

Предназначен для создания магнитного поля с заданными параметрами в терморазмагничивающих установках ММТD24 и ММТD80 для постановки экспериментов Телье (задачи 1.2., 1.4., 1.6. Плана работ).

2) Токарный станок MetalMaster MML1830V

Предназначен для изготовления деталей и запасных частей для приборов, что актуально при ремонте и усовершенствовании уникальных не серийных магнитометров (например, производства ГО "Борок" ИФЗ РАН).

3) Прямой промышленный микроскоп Olympus BX53

Предназначен для изучения минерального состава и структуры образцов горных пород. Теперь микроскопические анализы могут быть выполнены на базе лаборатории, не прибегая к услугам сторонних организаций, как это было раньше.

4) Измерительные приборы (Штангенциркуль IP67 Mahr, Штангенрейсмасс 814SR Mahr) и вспомогательные приспособления к ним

Предназначены для точных измерений изготавливаемых деталей для оборудования лаборатории.

5) Источник бесперебойного питания (ИБП) IMPULS Stayer 11-6, 6000BA/5400Вт

Предназначен для аварийного электроснабжения лабораторного измерительного комплекса.

6) Дрель аккумуляторная MAKITA DDF48IRTE (2 шт.) (переделаны в пробоотборники)

На основе приобретенных дрелей-шуруповертов сотрудниками лаборатории изготовлены портативные электрические пробоотборники для выбуривания мини-кернов горных пород для палео- и петромагнитных исследований. Новые пробоотборники имеют преимущество в малом весе, компактности и питании от аккумуляторов, что делает возможным их использование в замкнутых пространствах, например, шахтах, пещерах и т.п.

Также были закуплены комплектующие и материалы для оборудования и проведения научного исследования:

- 1) Алмазные диски для камнерезного станка;
- 2) Алмазные буровые коронки и ориентирующее устройство Pomeroy Orienting Fixture OR-2 для пробоотборников Pomeroy;
- 3) Люнеты и резцы для токарного станка;
- 4) Фильтры для компрессора SQUID-магнитометра;
- 5) Технические газы (азот, гелий) и газовое оборудование (манометр, шланги и т.п.) для каппабриджа AGICO MFK1-FA и MicroMag VSM 3900;
- 6) Комплект держателей для MicroMag VSM 3900;
- 7) Термопарный нагревостойкий провод для термомагнитометров производства ГО "Борок" ИФЗ РАН;
- 8) Комплектующие для каппабриджа AGICO MFK1-FA для криогенных измерений;
- 9) Модуль-охладитель Hailea HC-500A для SQUID-магнитометра;
- 10) Комплект оснастки для сервогидравлической системы RTR-4500;
- 11) Осветительное оборудование для измерительного комплекса лаборатории;
- 12) Снаряжение для полевых работ (надувные лодки, палатки, костровые принадлежности, ваучеры спутниковой связи и проч.);
- 13) Набор неодимовых магнитов для выделения магнитных фракций из образцов горных пород;

- 14) Набор инструментов;
- 15) Комплект деталей для трехкомпонентного магнитометра производства ГО "Борок" ИФЗ РАН

Приобретенные комплектующие позволили поддерживать техническое состояние лаборатории на должном уровне - это необходимо в условиях высокой рабочей загрузки измерительного комплекса.

Задача 1.14. Текущий ремонт лаборатории, а также прочие расходы, непосредственно связанные с проведением научного исследования.

Для успешного решения всех задач проекта были выполнены работы:

- 1) Закупка лабораторной мебели (2 стола для пробоподготовки, 3 шкафа для хранения материалов, коллекций образцов и лабораторной одежды). Новая мебель позволила оптимизировать рабочее пространство, что облегчило и ускорило процесс пробоподготовки и измерений.
- 2) Миграционное сопровождение ведущего ученого Ива Галле: юридическое консультирование по миграционным вопросам, оформление нового разрешения на работу в РФ, подача ежеквартальных уведомлений в МВД РФ о выплате ведущему ученому вознаграждения в соответствии с условиями договора. Услуги были предоставлены ООО "Виза-Делайт". Миграционное сопровождение ведущего ученого профессиональной компанией позволило соблюсти все юридические формальности миграционного учета и помогло ведущему ученому сконцентрироваться на руководстве научным исследованием.
- 3) Аренда служебного жилья для ведущего ученого во время его очного присутствия в ИФЗ РАН.
Наличие служебного жилья (двухкомнатные апартаменты в пешей доступности от института) обеспечило ведущему ученому качественный отдых, необходимый при его плотном рабочем графике.
- 4) Покупка компьютерной и оргтехники и комплектующих.
Практически все компьютеры, установленные на приборах лаборатории, в 2017г. были заменены на новые, что повысило производительность измерений и удобство работы с файлами. Все новые компьютеры сейчас унифицированы: каждый имеет набор программного обеспечения, позволяющий ему работать с любым измерительным прибором лаборатории.
- 5) Покупка канцелярских принадлежностей.

Задача 1.15. Участие ведущего ученого и членов научного коллектива в конференциях, научных семинарах, симпозиумах.

В 2017г. сделаны доклады на конференциях:

- 1) *Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН 2017*
- 7 докладов;
- 2) *IV Всероссийская молодежная научно-практическая школа-конференция "Науки о Земле. Современное состояние"* - 1 доклад Сальной Н.В., удостоенный диплома за лучший доклад, представленный на конференции;
- 3) *International Workshop on Geomagnetism, Rock Magnetism and Paleomagnetism: Theory, Practice, Experiment* - 27 докладов;
- 4) *Тектоника современных и древних океанов и их окраин. XLIX Тектоническое совещание*, посвященное 100-летию академика Ю.М. Пушаровского - 5 докладов;
- 5) *Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту)* - 4 доклада;
- 6) *Научно-практическая конференция «Среднеширотные геофизические обсерваторские наблюдения»*, посвященная 100-летию со дня рождения Валерии Алексеевны Троицкой и 60-летию Геофизической обсерватории «Борок» - 3 доклада;
- 7) *EGU General Assembly 2017* - 7 докладов;
- 8) *AGU Fall Meeting 2017* - 4 доклада;
- 9) *Rodinia 2017: Supercontinent Cycles and Global Geodynamics* - 1 доклад;
- 10) *International Conference on Rock Magnetism 2017* - 2 доклада.

За прошедший год сотрудники лаборатории представили результаты научного исследования на 10 научных конференциях, в т.ч. 5 международных. Среди конференций были как широкопрофильные

(например, EGU General Assembly и AGU Fall Meeting), собирающие тысячи специалистов разных областей наук о Земле со всего мира, так и специализированные в области палео- и петромагнетизма (например, International Conference on Rock Magnetism и International Workshop on Geomagnetism, Rock Magnetism and Paleomagnetism). Всего был сделан 61 доклад, таким образом можно уверенно утверждать, что результаты научного исследования представлены достаточно широко в мировом научном сообществе. Особенно следует отметить активность молодых сотрудников: почти все из них представили свои работы устными или постерными докладами, многие - на нескольких конференциях.

Задача 1.16. Организация конференции, проводимой научным коллективом по направлению научного исследования.

В 2017г. сотрудниками лаборатории организовано 2 конференции:

1) *Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН 2017*, в составе которой была выделена отдельная секция «Геодинамика и палеомагнитные исследования». Председателем программного комитета стал с.н.с. лаборатории д.г.-м.н. Р.В. Веселовский. Секция организована при активном участии сотрудников лаборатории.

2) *International Workshop on Geomagnetism, Rock Magnetism and Paleomagnetism: Theory, Practice, Experiment*.

Это ежегодная палеомагнитная конференция, организуемая при участии сотрудников лаборатории. Традиционно места проведения конференции чередуются: это ГО "Борок" ИФЗ РАН (пос. Борок, Ярославская обл-ть), Санкт-Петербургский Государственный Университет, Казанский Федеральный Университет. В этом году конференция прошла на базе Института геологии и нефтегазовых технологий КФУ. В состав оргкомитета конференции вошли д.г.-м.н. проф. Д.К. Нургалиев и д.ф.-м.н. В.П. Щербаков.

Таким образом, в прошедшем году было организовано 2 конференции по направлению научного исследования, в каждой из которых приняли участие порядка 100 специалистов, в т.ч. зарубежных. На конференциях сотрудниками лаборатории представлено в общей сложности более 30 докладов по теме научного исследования.

Задача 1.17. Подготовка и публикация статей по теме проекта.

Подготовлено и опубликовано 20 научных статей в журналах, индексируемых WoS, в т.ч. 2 статьи - в журналах, входящих в первую квартиль (Q1), и 4 статьи в журналах, входящих в список РИНЦ. Список статей представлен в разделе 5 отчета о научных исследованиях. Копии статей приложены к отчету (см. архивы "Подтверждение р.5.1. Отчета о НИ_Статьи_WoS" и "Подтверждение р.5.2. отчета о НИ_Статьи_Прочие").

Задача 1.18. Подготовка, переподготовка и повышение квалификации членов научного коллектива.

В 2017г. сотрудники лаборатории прошли повышение квалификации по следующим направлениям:

1) *Летняя Школа Университета Утрехта* в рамках Международной Конференции по Магнетизму Горных пород (Utrecht SummerSchool in the frames of International Conference on Rock Magnetism 2017).

Такие молодежные школы регулярно устраиваются ведущими мировыми специалистами в области палео-, гео- и петромагнетизма и направлены на повышение уровня знаний молодых специалистов в данных областях. Во время работы школы были прочитаны лекции о петромагнитных свойствах горных пород, методах их изучения и возможных практических приложениях. Занятия вели такие признанные ученые, как Карл Фабиан (Karl Fabian), Лиза Токс (Lisa Tauxe), Рамон Эгли (Ramon Egli), Роб ван дер Ву (Rob van der Voo).

В работе школы от лаборатории приняли участие аспиранты С.В. Акимова и Е.Б. Дегтярева.

2) *Школа для Молодых ученых «Актуальные практические применения данных палеомагнетизма и петромагнетизма»* в рамках конференции International Workshop on Geomagnetism, Rock Magnetism and Paleomagnetism: Theory, Practice, Experiment.

Данная школа по своим целям аналогична Utrecht SummerSchool. В рамках школы слушателям были прочитаны лекции о практических применениях петромагнитных данных при палеомагнитных исследованиях, разведке полезных ископаемых, палеотектонических реконструкциях и т.д. В школе приняли участие 8 молодых сотрудников лаборатории.

3) *Курсы подготовки к сдаче экзамена TOEFL по английскому языку.*

6 сотрудников лаборатории прошли трехмесячный курс английского языка,

специализированный к сдаче TOEFL (Test of English as a Foreign Language). Это стандартизованный тест на знание английского языка, сдача которого обязательна при поступлении на обучение в ВУЗы США, Европы и Азии, а также для работы в зарубежных странах. Сертификаты TOEFL будут нужны молодым сотрудникам лаборатории для стажировки в ведущих зарубежных лабораториях. Курсы проведены образовательным центром "Виндзор".

Сдача экзамена планируется в 2018г.

Задача 1.19. Характеристика эпох слабого магнитного поля в истории Земли: изучение напряженности геомагнитного поля.

Введение

Проблема палеомагнетизма девона имеет давнюю историю, и была обозначена еще на «заре» палеомагнитных исследований К. Криром при изучении нижнедевонской вулканогенно-осадочной формации Old Red Sandstone (ORS) Британских каледонид [Creer, Embleton, 1967 и ссылки в этой работе]. Первоначально суть этой проблемы сводилась к наличию двух значимо различающихся палеомагнитных направлений, зафиксированных в породах ORS. Данные направления, получившие в литературе наименования DI и DII [Creer, Embleton, 1967], фиксировались в одних и тех же разрезах и давали существенно различающиеся палеошироты. Близкая ситуация была выявлена отечественными исследователями на европейской части территории бывшего СССР [Палеомагнетизм палеозоя, 1974]. В результате дискуссии относительно природы DI и DII направлений была сформирована точка зрения, разделявшаяся большинством исследователей, согласно которой направление DI стало рассматриваться как результат позднепалеозойского перемагничивания, поскольку, с одной стороны, палеомагнитный полюс, соответствующий этому направлению, был близок к полюсам карбона – перми, а, с другой, направление DII лучше согласовалось с палеоклиматической зональностью для девона Восточно-Европейской платформы [Creer, 1968; Палеомагнетизм палеозоя, 1974]. В тоже время, при изучении ORS были выявлены и другие квазистабильные палеомагнитные направления, периодически повторяющиеся в разрезах, которые были интерпретированы как переходные зоны по отношению к направлениям DII прямой и обратной полярности [Sallomy, Piper, 1973; Kono, 1979].

Не меньшие проблемы возникли и при палеомагнитном исследовании девонских вулканитов азиатской части СССР, Северной Америки и других регионов земного шара, что определенно указывает на то, что проблема девонского поля носит глобальный характер.

Что касается определений напряженности геомагнитного поля, то до настоящего времени их было получено крайне мало и большинство из них не соответствовали принятым в настоящее время критериям надежности и качества. При этом следует отметить, что большинство из этих данных указывали на очень низкую напряженность девонского геомагнитного поля и, следовательно, на его сильное отличие от геомагнитного поля последних нескольких миллионов лет. Очевидно, что для изучения геомагнитного поля девона требуется получить достаточно большой массив новых и надежных данных. Эта задача решалась в ходе настоящей работы.

Объекты и методы

В ходе настоящей работы были изучены коллекции образцов, отобранных на протяжении 2007 – 2015 гг. Ориентированные образцы отбирались как вручную, так и с помощью механизированного пробоотборника, ориентировка образцов производилась магнитными и солнечными компасами. На Кольском полуострове опробовались, главным образом, дайки мощностью от менее 1 м до 60 м (Рис. 19.1.Б). В Минусинском регионе опробовались, в основном, вулканические потоки (Рис. 19.1.А.). Из большинства сайтов было взято от 10 до 20 ориентированных образцов. Разделение компонент намагниченности в образцах производилось при помощи температурной магнитной чистки и с использованием не менее 12 шагов чистки. Для определения носителей намагниченности использовался стандартный набор петромагнитных процедур, кроме того в ходе работ некоторое число аншлифов было изучено на микрозонде. Определение палеонапряженности выполнялось с использованием трех различных техник- классического метода Телье, метода Вилсона и относительно

новой микроволновой техники IZZI [Thellier & Thellier 1959; Wilson 1961; Tauхе & Staudigel 2004]. При отбраковке образцов мы использовали критерии отбора, предложенные в работах [Paterson et al., 2014; Biggin et al., 2007].

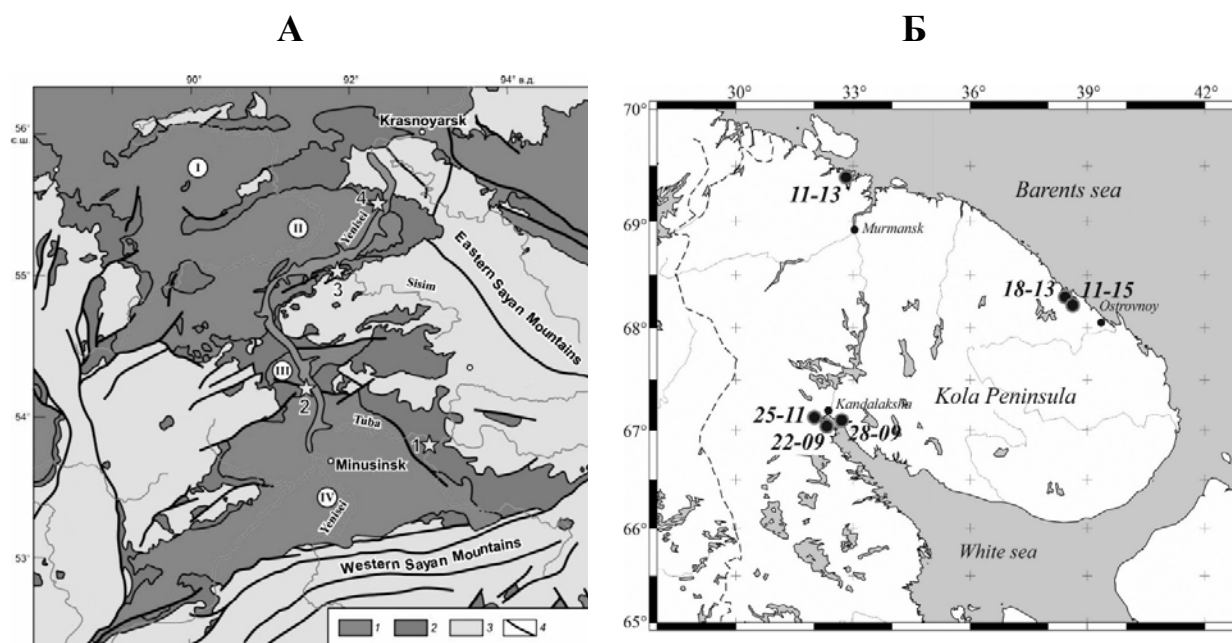


Рис. 19.1. Географическое положения мест отбора проб (показано арабскими цифрами). А – Минусинский регион; Б- Кольский полуостров.

Результаты

На первом этапе работ было выполнено изучение магнитной фракции исследуемых пород и доменного состояния слагающих ее зерен.

Основными носителями естественной остаточной намагниченности в вулканитах Минусинского региона являются гематит и минералы титаномагнетитового ряда, в разной пропорции присутствующие в изученных образцах (Рис. 19.2., Рис. 19.3.). Магнитные зерна имеют классическую структуру, возникающую при высокотемпературном окислении исходных титаномагнетитов, что указывает на, вероятно, термоостаточную природу несомой ими намагниченности. Как видно из Рис. 19.4. большинство зерен имеет псевдооднодоменную структуру, в целом, благоприятную для определения палеонапряженности.

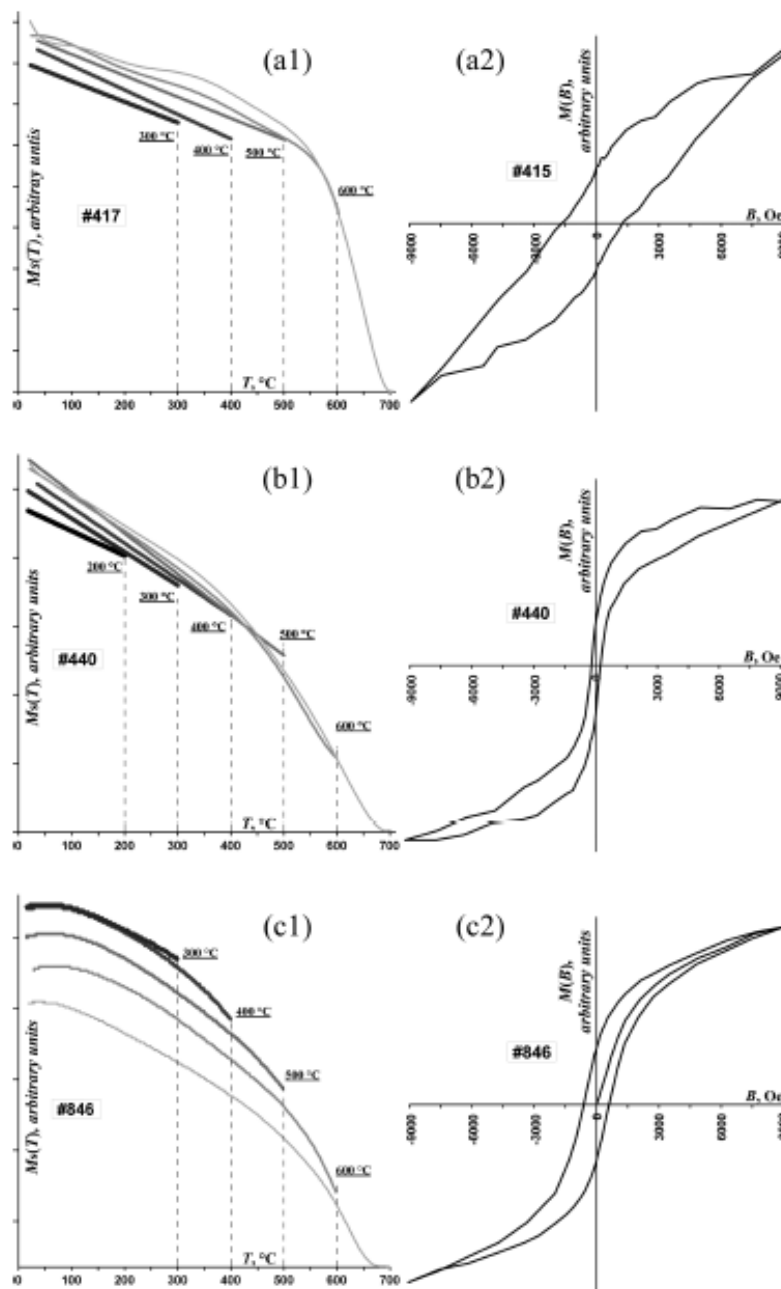


Рис. 19.2. Термомагнитные кривые и кривые магнитного гистерезиса для образцов вулканитов минусинского региона, показывающие присутствие гематита и магнетита, а также разную стабильность образцов по отношению к нагревам.

Данные термомагнитного анализа и изучения магнитного гистерезиса уверенно показывают, что основным носителем намагниченности в кольских дайках (Рис. 19.4.) является магнетит или низкотитанистый титаномagnetит.

Эти выводы подтверждаются результатами рентгено-структурного и микрозондового анализов.

В работе рассмотрены доводы в пользу того, что характеристическая компонента намагниченности, выделенная в изученных образцах, имеет термоостаточное происхождение. Основные аргументы в пользу этого вывода базируются на то, что исходно титаномagnetитовые зерна в образцах имеют структуру высокотемпературного окисления, размер ламелл, при этом, превышает 1 мкм, что согласно [Gareev & Tseltovich, 1983, 1986] указывает на то, что эта структура образовалась при температурах между 700 и 900°C.

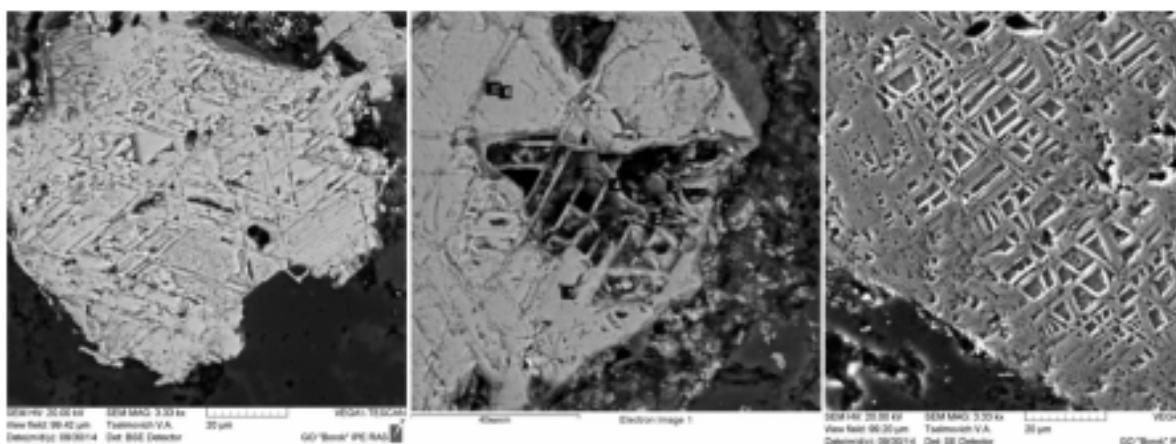


Рис. 19.3. Фотографии, сделанные на электронном микроскопе, показывающие разную реакцию на воздействие соляной кислоты зерен, содержащих: слева направо: гематит (ячейки распада не растворены); гематит и магнетит (часть ячеек растворено, часть - нет) и магнетит (все ячейки растворены).

Другим сильным аргументом в пользу первичности (т.е. термоостаточной природы) намагниченности является соответствие результатов определения палеонапряженности по образцам из удаленных мест и характеризующихся различающейся магнитной минералогией.

Обсуждение результатов

Прежде всего, отметим довольно хорошее схождение результатов, полученных разными методами. При этом следует отметить, что используемые методы дают немного, но систематически различающиеся результаты. Определения, сделанные микроволновым методом всегда несколько выше, определений методом Телье и Вилсона, определения по анализу Вилсона часто несколько выше, чем определения, сделанные методом Телье. Эти различия, однако, в среднем не превышают 4 мкТ, что никоим образом не влияет на основной результат, указывающий на крайне низкие значения напряженности геомагнитного поля во время формирования изученных вулканических потоков и даек.

Полученные нами результаты (Рис. 19.7.), наряду с ранее уже публиковавшимися данными по девону свидетельствуют в пользу сложной структуры геомагнитного поля девона, слабого по напряженности и характеризующегося очень сильными вариациями направлений. Поскольку эти результаты относятся к достаточно длительному (десятки миллионов лет) интервалу геологического времени, это означает, что отклонение поля от униформитарной модели с преобладающим дипольным полем имело долговременный характер. Как показано в работах [Aubert & Wicht, 2004; Morin & Dormy, 2009; Driscoll, 2016], такой сценарий может реализовываться благодаря ослаблению конвекции во внешнем ядре, что способствует переходу от режима геодинамо, генерирующего сильное дипольное поле к динамо-режиму, характеризующемуся слабым мультиполярным полем. Различные механизмы были предложены для объяснения возможных переходов геодинамо из дипольного режима в мультиполярное, включая такое, связанные с перераспределением теплового потока на границе ядро-мантия, с формированием и ростом суперплюмов, с формированием твердого ядра и др. Для выяснения того, какой из этих механизмов является наиболее вероятным необходимо дальнейшее накопление данных по палеонапряженности для разных эпох.

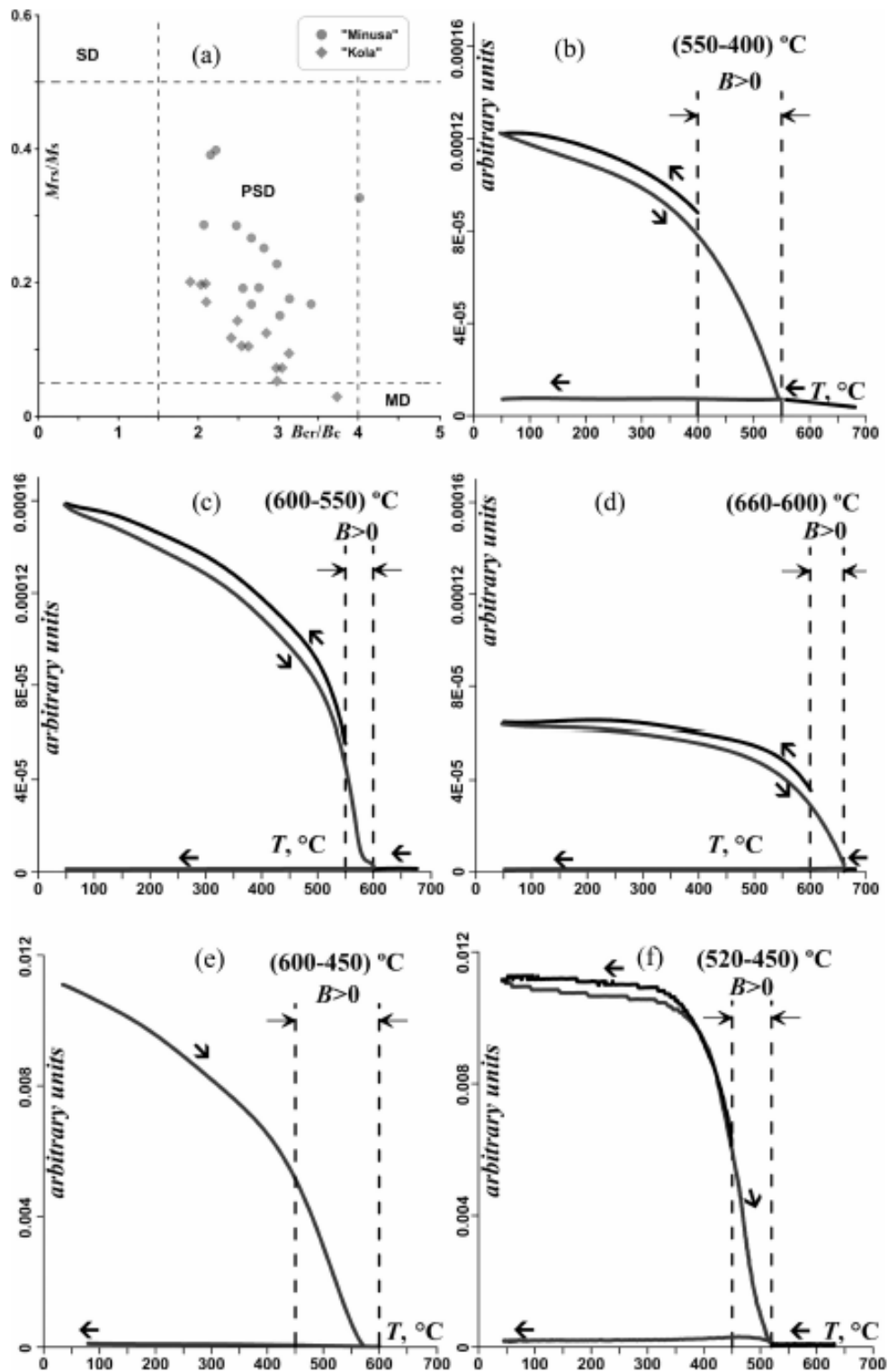


Рис. 19.4. Определение доменного состояния магнитных зерен в образцах из Минусинского региона (b-e) и с Кольского полуострова (f) с помощью термомагнитного критерия и с помощью диаграммы Дзя-Данлопа (a).

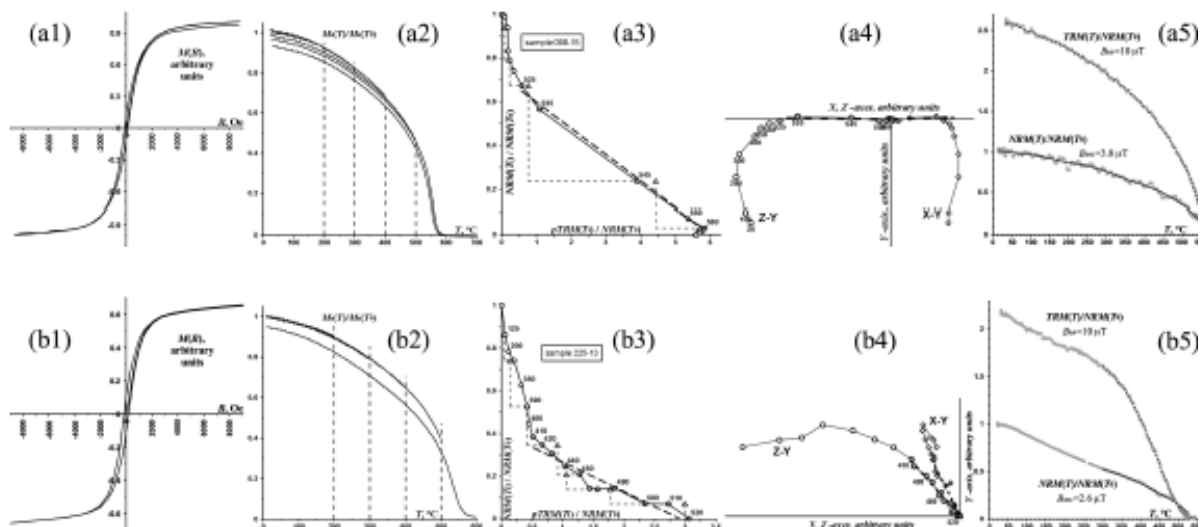


Рис. 19.5. Термомагнитные кривые и кривые магнитного гистерезиса (a1, a2 и b1, b2) для образцов даек Кольского полуострова, показывающие, что основным магнитным минералом в них является магнетит или низкотитанистым титаномagnetит. Кривые Арай-Нагата (a3, b3) и соответствующие им диаграммы зийдervельда. a5, b5 - примеры применения метода Вилсона на образцах кольских даек.

Наши результаты показывают, что особо интересным временным интервалом для таких исследований являются геологические периоды среднего палеозоя.

Заклучение

В работе показано, что осредненное по времени геомагнитное поле в интервале времени между 375 and 408 млн. лет назад было значительно слабее, чем поле последних нескольких миллионов лет, или, даже, последних 350 млн. лет, исключая только, возможно, среднеюрское время.

Выполненные определения получены по регионам, находящимся на значительном расстоянии друг от друга в настоящее время и, вероятно, разнесенных на еще большее расстояние в девонское время [Torsvik et al., 2012]. Для определений использованы образцы, отобранные из геологических тел с раз-

ной историей и механизмом формирования, различающихся также между собой по магнитной минералогии. Тем не менее, все изученные объекты дают очень схожие результаты, уверенно указывающие на то, что в рассматриваемый период времени виртуальный дипольный момент не превышал значение 20 ZAm^2 .

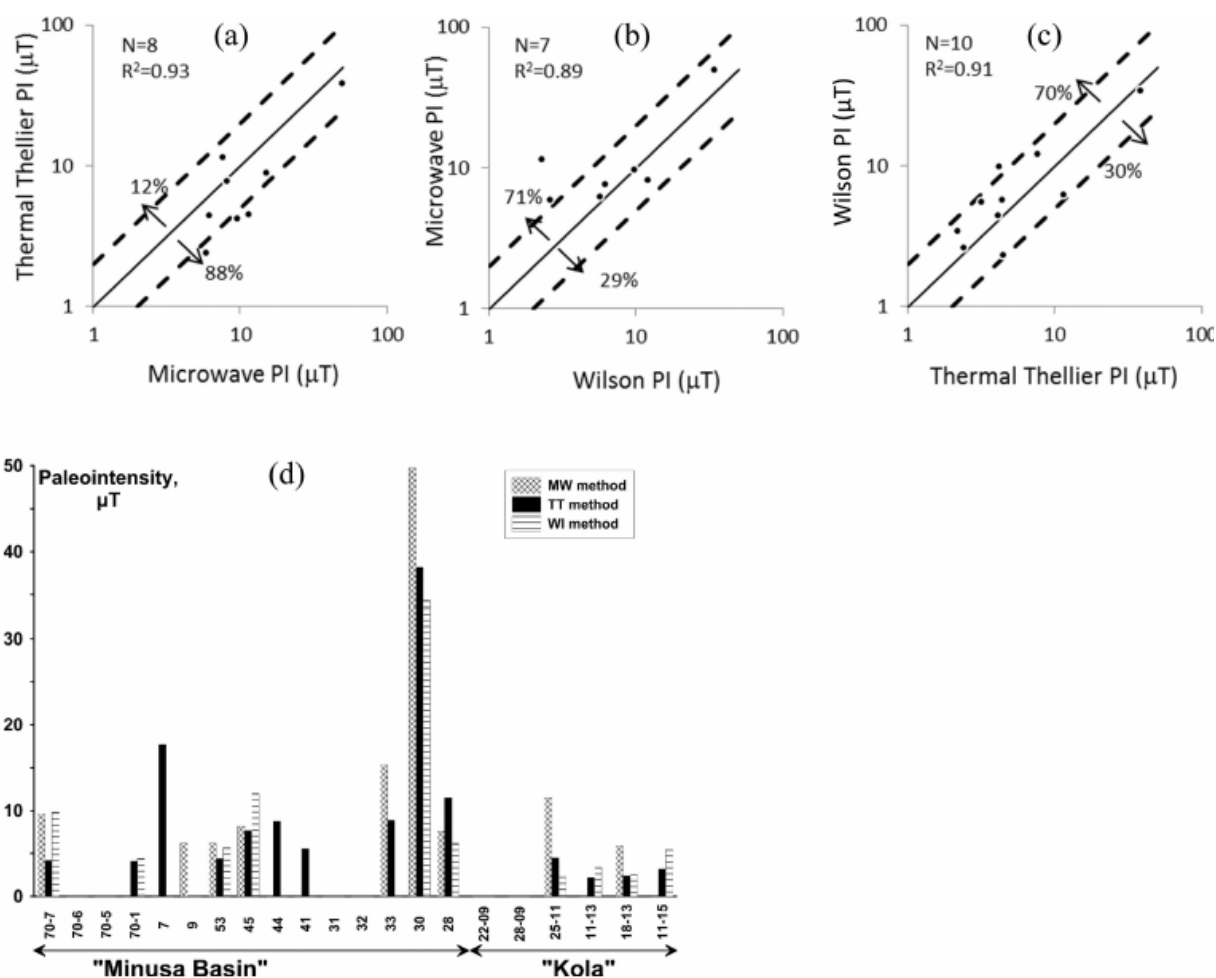


Рис. 19.6. a,b,c. Попарное сравнение результатов, полученных Телье методом, методом Вилсона и микроволновым методом. d – распределение величин палеонапряженности, определенных разными методами.

Этот результат вместе с данными о высокой вариабельности направлений геомагнитного поля определенно указывает на то, что в девонское время магнитное поле Земли сильно отличалось от современного и геодинамо в эту эпоху генерировало слабое мультиполярное поле. Точную длительность и

причины этого необычного состояния поля предстоит определить в будущем. Связь этого аномального состояния поля с процессами в ядре и в мантии, с условиями на поверхности Земли, с биологической и климатической эволюции пока не ясно, но может быть очень серьезным

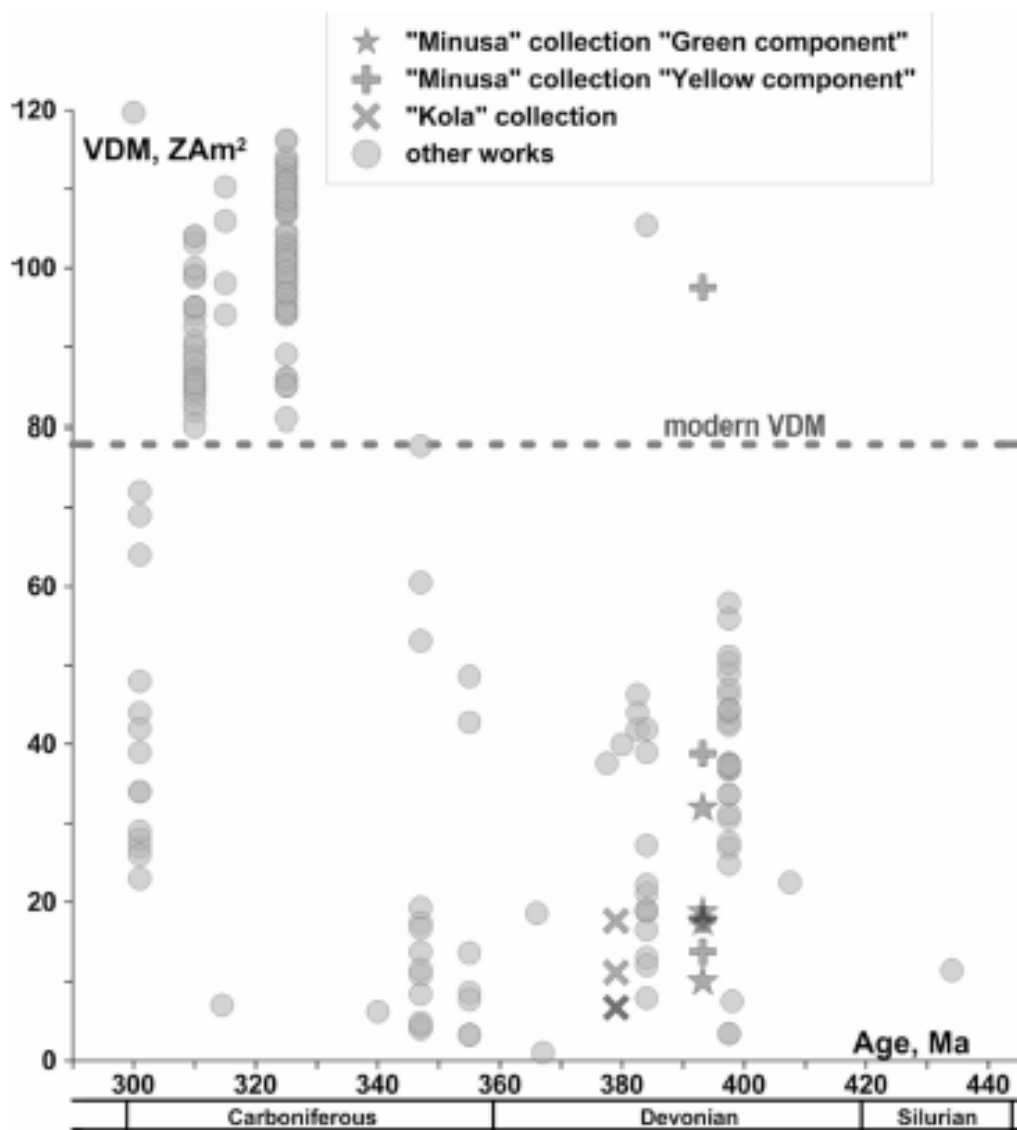


Рис. 19.7. Сравнение полученных данных (звездочка и крестики) с другими имеющимися данными по карбону, девону и силуру

Задача 1.20. Исследование подавления магнитным полем альфа-эффекта в геодинамо-моделях среднего поля.

Введение

Геомагнитное поле связывают с процессами динамо в жидком ядре Земли [Schubert, 2015]. Современные модели динамо весьма разнообразны, и варьируются от весьма простых моделей, например, моделей Лоренца и Рикитак, имеющих дело с системами обыкновенных дифференциальных уравнений галеркинского типа, до трехмерных моделей в частных производных, учитывающих разнообразные механизмы конвекции и теплопереноса. Особое место занимают модели среднего поля [Krause & Radler, 1980], сочетающие строгое математическое описание, поддающееся в некоторых случаях аналитическому исследованию, и в тоже время, имеющие точность описания магнитного поля, сравнимую с точностью палеомагнитных записей на геологических временах. Модели среднего поля могут, как включать уравнения движения, как это было в Z-модели Брагинского, так и содержать простые нелинейности, описывающие влияние магнитного поля на заданное течение. Последний вариант популярен при исследованиях солнечного динамо [Brandenburg & Subramanian, 2005]. Очевидно, что во втором случае информация о течениях крайне важна. Это связано с тем фактом, что из анализа самосогласованных трехмерных моделей динамо известно, что влияние магнитного поля на течение не велико [Jones, 2000]. Другими словами, переход от кинематического динамо, когда поле скорости задано, к нелинейному режиму, когда силы Лоренца (или нелинейность) замедляют экспоненциальный рост магнитной энергии, не сопровождается ощутимым изменением течений. Это означает, что, задавшись профилем поля скорости, взятым из трехмерных моделей конвекции в жидком ядре, можно получить реалистичное решение для магнитной задачи в моделях среднего поля, ограничившись простым видом нелинейности. Кон-

векция в жидком ядре весьма специфична и характеризуется геострофичностью, связанной с наличием баланса градиента давления и силы Кориолиса, вызванной быстрым суточным вращением планеты. Данный баланс приводит к вытянутости силовых линий поля скорости вдоль оси вращения. Течения турбулентны, конвективные ячейки представляют собой циклоны и антициклоны, с отношением поперечного (относительно оси вращения) масштаба к продольному много меньше единицы. Такая структура течений сопровождается появлением ненулевой средней гидродинамической спиральности, которая в свою очередь, приводит к появлению альфа-эффекта, и далее -- к генерации крупномасштабного магнитного поля планеты.

В настоящей работе, на примере двумерной модели среднего поля Паркера с геострофически распределенными источниками энергии (альфа-эффектом и дифференциальным вращением, омега-эффектом) и простым видом нелинейности, рассмотрено как происходит генерация дипольного магнитного поля в жидком ядре Земли и каково воздействие магнитного поля на альфа-эффект.

Краткое описание объектов и методов

В работе использована модель среднего поля с алгебраической формой нелинейности [Reshetnyak, 2016]. Используемая модель среднего поля Паркера включает два осесимметричных уравнения для полоидальной и тороидальной компонент среднего магнитного поля, зависящих от радиуса и широты. Воздействие магнитного поля на турбулентность описывается алгебраической нелинейностью. Программный C++ код реализован как для вариантов отдельного расчета при фиксированном наборе параметров, так и для параллельных расчетов уже для набора параметров на многоядерных компьютерах с помощью MPI. Последнее удобно для исследования фазового портрета модели.

Описание результатов

В качестве примера рассмотрен режим генерации магнитного поля, когда радиальное магнитное поле сконцентрировано внутри Тейлоровского Цилиндра (воображаемого цилиндра, описывающего твердое ядро Земли, и расположенного вдоль оси вращения планеты). Силовые линии магнитного поля вытянуты вдоль оси, см. Рис. 20.1.a. Интересно отметить, что использование течений, полученных в самосогласованных трехмерных моделях тепловой конвекции, позволяет получить Z-конфигурации магнитного поля аналогичные тем, что были получены Брагинским, где магнитное поле воздействовало на крупномасштабное течение. В этом смысле наша модель является более простой и удобной, поскольку мы не решали уравнения крупномасштабной конвекции. На поверхности Земли данная конфигурация поля соответствует магнитному диполю. Амплитуда источника энергии в модели определяется произведением альфа- и омега-эффектов. Это двумерные функции, зависящие от радиуса и широты. Магнитное поле, в свою очередь, воздействует на альфа-эффект. На Рис. 20.1. представлено произведение этих двух величин. Как видно из рисунка, степень их пространственной корреляции весьма невелика — всего 10%. Другими словами, эти два эффекта сосредоточены в разных пространственных областях. Фактически, распределение источников энергии является двухслойным. Анализ пространственных распределений источников с учетом подавления альфа-эффекта магнитным полем позволяет объяснить существование динамо-волны в направлении полюса, предсказываемой правилом Йошимуры [Yoshimura, 1975].

Обсуждение результатов

Одним из интересных свойств полученного решения, является тот факт, что магнитное поле сконцентрировано в области, не соответствующей максимуму источников энергии, т.е. альфа- и омега-эффектов. Это связано с тем, что

градиенты этих источников велики в направлении, перпендикулярном оси вращения. С другой стороны, волна, направленная к полюсу, сносит магнитное поле внутрь ТЦ. Поле в этой области является однородным, как вдоль оси вращения, так и в перпендикулярном направлении, см. Рис. 20.1.а. Это означает, что и эффекты диффузии очень малы в этой области. Магнитное поле внутри ТЦ, даже не имея больших источников энергии, может существовать длительное время, не затухая.

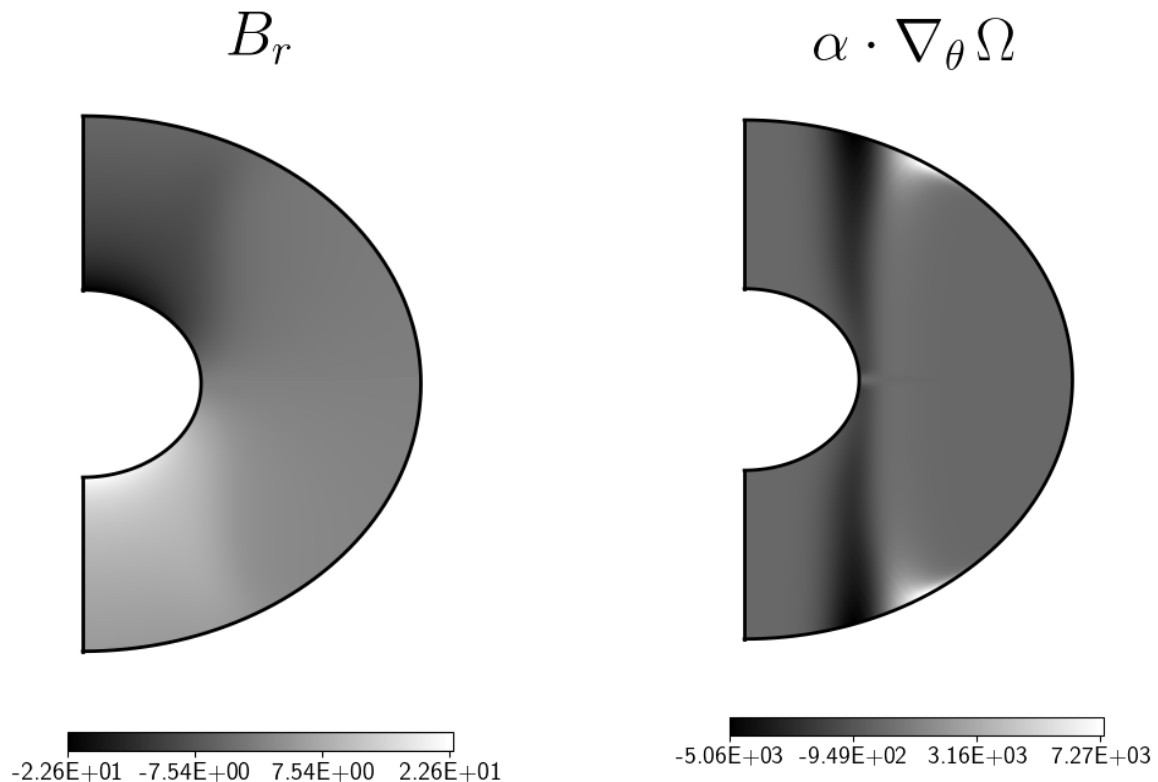


Рис. 20.1. Меридиональное сечение радиальной компоненты магнитного поля B_r (слева) и произведения двух источников энергии в модели: подавленного магнитным полем альфа-эффекта и компоненты дифференциального вращения (справа).

Выводы

В работе рассмотрены механизмы образования дипольного магнитного поля в ТЦ в жидком ядре Земли. Несмотря на тот факт, что при небольших числах Рэлея, соответствующих высокой степени геострофии, источники энергии (альфа-эффект и дифференциальное вращение) сосредоточены вне ТЦ, полоидальное магнитное поле сосредоточено внутри него. Показано, что этот эффект связан со слабой диссипацией однородного полоидального магнитного поля в ТЦ. Отмечено, что случайные флуктуации альфа-эффекта, ассоциируемые с турбулентностью в жидком ядре, могут приводить к возникновению волн, как не зависящим от широты на поверхности жидкого ядра, так и к бегущим к полюсам в глубине ядра. Рассмотренная модель позволяет связать палеомагнитные наблюдения с результатами трехмерного моделирования в терминах простой альфа-омега-модели среднего поля.

Задача 1.21. Приобретение оборудования для научных исследований.
Приобретение материалов и комплектующих для оборудования.

За счет внебюджетных средств в 2017г. было приобретено:

- 1) Комплектующие для прямого промышленного микроскопа Olympus BX53, которые включают набор объективов и вспомогательных приспособлений, предназначенных для расширения функциональных возможностей микроскопа.
- 2) Высокопроизводительные компьютеры для математической обработки данных, включающие мощные графические карты и процессоры, необходимы для специальной обработки данных. Вычисления, выполняемые на обычных компьютерах, занимают много времени. Использование новых вычислительных машин позволяет обрабатывать большие массивы данных с большей скоростью.

1.22. Текущий ремонт лаборатории, а также прочие расходы, непосредственно связанные с проведением научного исследования.

Выполнение проекта, помимо непосредственных научных задач, подразумевало поддержание лаборатории в исправном техническом состоянии, а также административное сопровождение работ вспомогательными подразделениями института. ИФЗ РАН за счет собственных средств поддерживал функционирование лаборатории, как с технической стороны, так и в организационно-административном плане.

За счет внебюджетных средств ИФЗ РАН в 2017г. были оплачены:

- 1) Коммунальные и хозяйственные расходы лаборатории;
- 2) Надбавки сотрудникам АХО за организационно-техническое обеспечение проекта.

Заключение

Все задачи, поставленные на первый год работ по Проекту, успешно решены. При этом получены следующие основные результаты:

- 1.1. Выполнены исследования, направленные на определение возможности повышения чувствительности трёхкомпонентного термомагнитометра, по результатам выполненных экспериментов показано, что повышение чувствительности существующих датчиков на базе отечественных материалов в настоящее время не представляется возможным
- 1.2. Разработан протокол автоматической коррекции влияния анизотропии термоостаточной намагниченности на результаты определения величины напряженности древнего магнитного поля и выполнена его программно- аппаратурная реализация на трёхкомпонентном термомагнитометре, производства ГО «Борок» ИФЗ РАН. Создан не имеющий аналогов в России прибор, который позволяет существенно увеличить производительность и эффективность научных исследований в области магнетизма, палео- и археомагнетизма.
- 1.3. Выполнены экспериментальные исследования и проведён теоретический анализ свойств химической остаточной намагниченности CRM. Показано, что определение «палеонапряжённости», определённая на образцах, содержащих этот вид намагниченности приводит к получению значений, заниженных в 2-3 раза по сравнению с истинным полем. Выполнено численное моделирование методом Монте-Карло процесса образования CRM в системе однодоменных (ОД) взаимодействующих частиц, показано, что спектры деблокирующих температур CRM и TRM имеют очень большое сходство.
- 1.4. На территории Ирака выявлен тренд к снижению значений напряженности геомагнитного поля на протяжении шестого тысячелетия до н.э., с наличием четкой ступенчатой эволюцией поля в интервале ~5600 –

5400 лет до н.э. Резкое падение напряженности геомагнитного поля сопровождалось узким пиком (продолжительностью предположительно менее одного столетия) около 5500 лет до н.э. Показано отсутствие значительных вариаций напряженности геомагнитного поля на протяжении 7-го тысячелетия до н.э. Значения напряженности геомагнитного поля в этом интервале хорошо согласуются с таковыми, полученными ранее по археологическим памятникам Сирии.

- 1.5. Получены палеомагнитные данные, подтверждающие высокую перспективность такырных отложений для изучения вариаций геомагнитного поля на протяжении последних тысячелетий. Выполнена массовая палеомагнитная чистка отобранных ранее коллекций такырных отложений. Интерпретация данных выполненных чисток, позволит получить к концу 2018 г. детальную запись вариаций геомагнитного поля в Средней Азии на протяжении последних нескольких тысячелетий. Начаты детальные исследования петромагнитных свойств образцов из такыров и их датирование. Выполняются палинологические и гранулометрические исследования, результаты которых позволят получить существенные ограничения на эволюцию климата в Центральной Азии на протяжении последних тысячелетий.
- 1.6. Получены новые данные о напряженности геомагнитного поля на территории Центральной России в интервале времени начало XVIII века – первая треть XIX века. Эти данные хорошо согласуются с вариациями геомагнитного поля, наблюдаемыми на территории Западной Европы в течение того же временного периода. Последнее дает основание считать, что в рассматриваемое время вклад недипольных источников в геомагнитное поле на территории Европы был незначителен. Выполнено тестирование существующих глобальных моделей геомагнитного поля

для последних столетий. Полученным данным в лучшей степени соответствуют те из них, которые предполагают несущественные изменения геомагнитного поля в период с XVIII по XIX вв.

- 1.7. На ряде озер Центральной России и Приуралья выполнены сейсмоакустические исследования, которые позволили выявить озера и оптимальные точки перспективные для отбора керновых колонок для палеомагнитных исследований. Проведен детальный отбор образцов (более 1300) для лабораторных исследований. Проведены магнитно-минералогические, предварительные палеомагнитные и палеобиологические исследования осадков. Радиоуглеродным методом выполнен ряд определений абсолютного возраста осадков. На основе полученных данных, построены модели временного масштаба и мастер-кривые. Полученные мастер-кривые сопоставлены с известными записями по озерам Восточной и Западной Европы, выявлены некоторые особенности, возможно, связанные с влиянием недипольных источников геомагнитного поля.
- 1.8. Выполнены расчеты, которые позволили уточнить связь пространственных и временных масштабов изменчивости магнитного поля, возникающего из геодинамо. Показано, что вплоть до $n=44$ имеется структура зависимости автокорреляций коэффициентов $g_n^m(t)$, $h_n^m(t)$ при сферических гармониках от параметров n, m . В первом приближении эта зависимость эффективной ширины $a(n, m)$ автокорреляционной функции по порядку величины обратно пропорциональна $(n+m)$. Вариация параметров геодинамо, полярность исследуемого поля не влияют на эту оценку. Также получены уточнения указанной зависимости, позволяющие утверждать существование поправочных членов в найденной аппроксимации.
- 1.9. Изучены представительные палеомагнитные коллекции пород раннекембрийского и позднеэдиакарского возраста Севера, Северо-Востока и

Востока Сибирской платформы. Получены новые свидетельства аномального характера палеомагнитной записи в породах позднего эдиакария-нижнего кембрия Сибирской платформы. Выполнен анализ мировых палеомагнитных данных для этого интервала геологической истории. Показано, что наблюдаемые в Сибири особенности палеомагнитной палеомагнитной записи для границы докембрия и фанерозоя носят планетарный характер, не согласуются с традиционными представлениями о палеомагнитной записи, как отражающей преимущественно аксиально-дипольный характер геомагнитного поля и требуют допущения, что геомагнитное поле на границе протерозоя и фанерозоя (эдиакария-нижнего кембрия) существенно отличалось от геомагнитного поля более поздних эпох. Это поле характеризовалось наличием двух квазистабильных режимов генерации, поочередно сменяющих друг друга. Предложена гипотеза, согласно которой магнитное поле Земли на границе докембрия и кембрия может быть описано чередованием продолжительных периодов господства аксиального преимущественно монополярного дипольного поля, перемежающегося с относительно кратковременными (длительностью порядка сотен тысяч лет) эпохами преобладания инверсирующего близэкваториального или среднеширотного диполя.

- 1.10. Изучены представительные палеомагнитные коллекции мезо-неопротерозойских пород севера и северо-востока Сибирской платформы. Получены новые палеомагнитные данные о положении Сибирской платформы в неопротерозое. Рассчитаны палеомагнитные полюсы, существенно дополняющие траекторию кажущейся миграции полюса (ТКМП) Сибирской платформы в неопротерозое. Новые палеомагнитные полюсы подтверждают существование индоокеанского тренда неопротерозойских полюсов Сибири. Показано, что во временной про-

межуток ~920-800 млн. лет Сибирская платформа испытала перемещение из экваториальных широт примерно на 15° в северном направлении и расположилась в приэкваториальных широтах.

- 1.11. Выполнены обширные палеомагнитные, геохронологические, изотопно-геохимические, структурно-геологические и седиментологические исследования позднедокембрийских и раннепалеозойских комплексов северной (Заангарской) части Енисейского кряжа. Выполнен анализ геолого-геофизической информации по строению фундамента прилегающей к Енисейскому кряжу с запада части эпигерцинской Западно-Сибирской плиты. Сделан вывод, согласно которому этот регион представляет собой перекрытую комплексами мезозойско-кайнозойского чехла глубокопогруженную западную часть Сибирской платформы. Показано, что западная граница Сибирской платформы расположена существенно западнее по сравнению с положением этой границы на современных тектонических картах. Создана численная модель бассейновой эволюции этой глубокопогруженной части Сибирской платформы в позднем докембрии и фанерозое. Показано, что из трех ранее сформулированных вариантов эволюции ее западной периферической части в позднем докембрии и самом начале палеозоя наиболее вероятной следует считать концепцию, в соответствии с которой позднерифейские и вендские комплексы и структуры, экспонированные в современной структуре Енисейского кряжа, были транслированы сюда по крупноамплитудной левосторонней трансензионной системе.
- 1.12. Завершена интерпретация палеомагнитных данных, полученных в ходе исследований малгинской и тоттинской среднерифейских свит, отобранных в пределах Горностахской антиклинали (восток Сибирской платформы). Получены следующие основные результаты: 1. Тектонический блок, к которому принадлежит Горностахская антиклиналь Сетте-Дабана не испытал вращений при надвигании на Сибирскую платформу и,

следовательно, палеомагнитные полюсы Горностахской антиклинали могут быть отнесены ко всей Сибирской платформе; 2. Получены данные, которые указывают на существенную диахронность границы тоттинской и малгинской свит в пределах Учуро-Майского региона; 3. Получены ограничения на палеогеографическое положение Сибирской платформы между ~1050 и 1100 млн. лет назад; 4. Получено палеомагнитное доказательство того, что в течение интервала времени 1100-950 млн. лет Сибирь и Лаврентия входили в состав единого суперконтинента (Родиния). Подтверждены ранние результаты [Павлов и др., 2002], согласно которым юго-юго-восточная окраина Сибири была обращена к северным территориям Лаврентии; 5. Минимизация расхождений кривых КМП Сибири и Лаврентии приводит к наличию между этими древними кратонами некоторого пространства, которое в составе суперконтинента Родиния могло быть занято неким третьим континентальным блоком.

- 1.13. Закупленные комплектующие и расходные материалы позволили поддерживать техническое состояние лаборатории на должном уровне - это необходимо в условиях высокой рабочей загрузки измерительного комплекса.

Приобретен профессиональный микроскоп Olympus BX53, который позволяет изучать минеральный состав образцов горных пород микроскопическими методами.

Создана система аварийного электропитания измерительного комплекса, позволяющая кратковременно (до 20-30 мин.) поддерживать электроснабжение приборов во время "блэкаутов" - это важное решение необходимо для круглосуточных бесперебойных измерений. Измерительные инструменты и токарный станок позволили самостоятельно изготавливать детали и запасные части для приборов.

- 1.14. Оптимизировано рабочее пространство в помещении измерительного комплекса и помещении для пробоподготовки.

На все измерительные приборы лаборатории установлены новые компьютеры. Все новые компьютеры унифицированы: каждый имеет набор программного обеспечения, позволяющий ему работать с любым измерительным прибором лаборатории.

- 1.15. Результаты научного исследования представлены на 10 научных конференциях, в т.ч. 5 международных. Всего был сделан 61 доклад, таким образом можно уверенно утверждать, что результаты научного исследования представлены достаточно широко в мировом научном сообществе. Особенно следует отметить активность молодых сотрудников: почти все из них представили свои работы устными или постерными докладами, многие - на нескольких конференциях.
- 1.16. Организовано 2 конференции по направлению научного исследования, в каждой из которых приняли участие порядка 100 специалистов, в т.ч. зарубежных. На конференциях сотрудниками лаборатории представлено в общей сложности более 30 докладов по теме научного исследования.
- 1.17. В 2017г. сотрудниками лаборатории опубликовано 24 статьи по теме научного исследования, 20 из них - в высокорейтинговых журналах, индексируемых в базе данных WoS, в т.ч. 2 статьи - в журналах, входящих в первую четверть (Q1).
- 1.18. 10 молодых сотрудников лаборатории приняли участие в коротких курсах магнетизма горных пород. В результате они переняли передовой опыт применения петромагнитных методов в палеомагнитных исследованиях, разведке полезных ископаемых и исследованиях магнетизма окружающей среды (environmental magnetism).

Шесть сотрудников лаборатории улучшили свои навыки владения английским языком, что позволит им получить в 2018г. сертификаты TOEFL и положительно отразится на качестве их научных статей в англоязычных журналах и выступлениях на международных конференциях.

- 1.19. Изучение вариаций геомагнитного поля в различных масштабах времени критично для понимания процессов, происходящих в ядре Земли, для изучения мантийной динамики и планетарной эволюции. Более того, вопрос о том насколько геомагнитное поле прошлого было похоже на преимущественно дипольное поле позднего кайнозоя критичен для определения надежности предложенных к настоящему времени палеогеографических и палеотектонических реконструкций, а также для оценки защитных (от космического излучения) свойств магнитосферы в геологическом прошлом. Ряд выполненных ранее исследований давали основание думать, что на протяжении большей части девона (419–359 Ma) геомагнитное поле имело сложную, существенно недипольную конфигурацию. В настоящей работе представлены результаты исследования вулканических потоков, силлов и даек Кольского полуострова и Минусинского региона Сибири с возрастом между 408 и 375 млн. лет, которые позволяют оценить напряженность геомагнитного поля в течение соответствующего временного периода. На образцах, отобранных из этих объектов, нами были выполнены эксперименты по определению напряженности геомагнитного поля девона с использованием классического метода Телье, метода Вилсона, а также, новой микроволновой техники. Всего было изучено 165 образцов, отобранных из 25 обнажений. 12 из 14 сайтов, для которых удалось получить качественные определения, дают результаты, которые определенно указывают на крайне низкую ($<10 \mu\text{T}$) напряженность девонского геомагнитного поля. Эти дан-

ные, наряду с имеющейся информацией об очень высоком разбросе палеомагнитных направлений в девоне, свидетельствуют в пользу неуниформитарного поведения геомагнитного поля в рассматриваемый интервал времени и поддерживают гипотезу о том, что геометрия магнитного поля Земли на протяжении многих миллионов лет могла значительно отличаться от дипольной. Долговременное ослабление магнитного поля и его отклонение от дипольной геометрии могло существенно усилить влияние солнечного (космического) излучения на магнитосферу, ионосферу и атмосферу с потенциально серьезными последствиями для эволюции климата и биосферы.

- 1.20. Рассмотрена двумерная модель динамо среднего поля с алгебраической формой нелинейности. Геострофические альфа-эффект и дифференциальное вращение взяты из трехмерных моделей конвекции в жидком ядре Земли. Анализ показывает, что они локализованы в разных пространственных областях, и их корреляция составляет не более 10%. Модель позволяет генерировать характерное Z-образное распределение полоидального магнитного поля, сконцентрированное внутри Тейлоровского цилиндра.
- 1.21. Закуплено новое оборудование, расширившее технические возможности лаборатории.
- 1.22. Институтом обеспечена техническая и административная поддержка лаборатории.

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 находится в обработке или готовится к печати. Полученные результаты составляют серьезный задел для успешного достижения целей Проекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев Ю.В., Феррозонды. – М.:Энергия, 1969.
2. Бураков К.С., «Древнее геомагнитное поле по результатам исследования разных видов намагниченности пород и материалов археологических памятников» Москва, 2000, 294с. Докторская диссертация
3. Бурлацкая С.П., Начасова И.Е., Диденко Е.Ю., Шелестун Н.К. Археомагнитные определения элементов геомагнитного поля // М.:ВИНИТИ, 1986. С.168.
4. 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.
5. 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 кряжа // Геология и геофизика. 2009. Т.50, №5. С.576-594.
6. Верниковская А.Е., Верниковский В.А., Сальникова Е.Б., Даценко В.М., Котов А.Б., Ковач В. П. Неопротерозойское анорогенное магматическое событие на Енисейском кряже: новые геохимические и изотопно-геохронологические данные // ДАН, 2005. Т.403. №5. С.656-660.
7. 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 кряжа – индикаторы неопротерозойских коллизионных событий // Геология и геофизика. 2002. Т.43(3). С.259-272.
8. Верниковский В.А., Верниковская А.Е. Тектоника и эволюция гранитоидного магматизма Енисейского кряжа // Геология и геофизика. 2006. Т.47 (1). С.35-52.

9. 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. Позднерифейский щелочной магматизм западного обрамления Сибирского кратона – результат континентального рифтогенеза или аккреционных событий? // ДАН. 2008. Т.419. № 1. С.90-94.
10. Верниковский В.А., Метелкин Д.В., Верниковская А.Е. и др. Неопротерозойская тектоническая структура Енисейского кряжа и формирование западной окраины сибирского кратона на основе новых геологических, палеомагнитных и геохронологических данных // Геология и геофизика. 2016, Т.57. №1. С.63-90.
11. Веселовский Р. В., В. Э. Павлов, П. Ю. Петров. Новые палеомагнитные данные по Анабарскому поднятию и Учуро-Майскому району и их значение для палеогеографии и геологической корреляции рифея Сибирской платформы. Физика Земли, № 7, Июль 2009, С. 3-24.
12. Веселовский Р.В., Петров П.Ю., Карпенко С.Ф., Костицын Ю.А., Павлов В.Э. Новые палеомагнитные и изотопные данные по позднепротерозойскому магматическому комплексу долины реки Фомич (северный склон Анабарского поднятия). 2006. ДАН. Т.410. №6.
13. Геологическая карта СССР масштаба 1:1 000 000 (новая серия).
14. 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.
15. Давыдов В.Ф., Кравчинский А.Я. Палеомагнитные исследования горных пород Восточной Сибири. В кн.: Настоящее и прошлое магнитного поля Земли. М.Наука. 1965. С.294-302.
16. Казанский А.Ю. Эволюция структур западного обрамления Сибирской платформы по палеомагнитным данным. Автореферат дисс. д.г.-м.н. Новосибирск. 2002. 40с.

17. Киренский Л.В., Магнетизм. – М.: Наука, 1967.
18. Комиссарова Р.А. Палеомагнетизм осадочных толщ рифея и венда Западного Прибайкалья. В сб. Палеомагнетизм верхнего докембрия. Л. Изд. ВНИГРИ.1983. С.52-66.
19. Комиссарова Р.А., Осипова Э.П. Результаты палеомагнитного изучения пород среднего рифея – кембрия р.Мая. В сб. Магнитостратиграфия и палеомагнетизм осадочных и вулканогенных формаций СССР. Палеомагнетизм и аккреционная тектоника. Л., ВНИГРИ, 1986. 98 с. Ред Храмов А.Н. С.5-13.
20. 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.
21. Крылов П.С., Нургалиев Д.К., Ясонов П.Г. Об истории развития озера Балхаш (Казахстан) по сейсмоакустическим данным //Ученые записки Казан. ун-та. Сер. Естественные науки. 2014. Т. 156, кн. 1.
22. 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 (в печати)
23. 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.
24. 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.

25. 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.

26. Лиханов И.И., Ревердатто В.В., Попов Н.В., Козлов П.С. Первая находка гранитов рапакиви на Енисейском кряже: возраст, РТ-условия и обстановки формирования // ДАН. 2012. Т.443. № 2, С.207-213.

27. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. – М.: Оникс 21 век, 2005.

28. Мишин Д.Д. Магнитные материалы. – М.: Высшая школа, 1981.

29. Начасова И.Е. Магнитное поле в районе Москвы с 1480 по 1840 гг. // Геомагнетизм и аэрономия. 1972. Т. 12, № 2. С.316–320.

30. 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.

31. 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.

32. Объяснительная записка. Лист R-(50)-52 — Тикси. Л., 1983, с. 135 (Министерство геологии СССР, ВСЕГЕИ), отв.ред. Межвилк А.А., Марков Ф.Г.

33. Олейников Б.В., Мащак М.С., Колодезников И.И., Копылова А.Г., Саввинов В.Т., Томшин М. Д., Туласынов Б.Н. Петрология и геохимия позднедокембрийских интрузивных базитов Сибирской платформы. Новосибирск, Наука, 1983, 206 с.

34. Осипова Э.П. Палеомагнетизм отложений среднего кембрия западного крыла Чекуровской антиклинали. В сб. Палеомагнетизм и аккреционная тектоника. Л., ВНИГРИ, 1988, 188 с. Ред Храмов А.Н. С.93-100.
35. Паверман В.И., Пасенко А.В., Шацилло А.В., 2018. Казанский петрохронологический центр: первые результаты датирования цирконов из неопротерозойских толщ северо-востока и юга Сибирской платформы // Проблемы тектоники и геодинамики земной коры и мантии. Материалы L (50-го) юбилейного Тектонического совещание. М. ГЕОС. Т.2. (в печати).
36. Павлов В.Э, Галле И., Шацилло А.В., Водовозов В.Ю.. Палеомагнетизм нижнего кембрия долины нижнего течения р.Лена – новые ограничения на кривую кажущейся миграции полюса Сибирской платформы и аномальное поведение геомагнитного поля в начале фанерозоя. 2004. Физика Земли, , No.2,, с. 28–49.
37. Павлов В.Э., Галле И., Шацилло А.В. Палеомагнетизм верхнерифейской лахандинской серии Учуро-Майского района и гипотеза позднепротерозойского суперконтинента. // Физика Земли. 2000, №8, С.23-24.
38. Палеомагнитные направления и палеомагнитные полюса (ПНиП). Данные по СССР. Вып.1. Л.1971. 124 с. Ред. Храмов А.Н.
39. Палеомагнитные направления и палеомагнитные полюса (ПНиП). Данные по СССР. Вып.2. М.1973. 89 с. Ред. Храмов А.Н.
40. Палеомагнитные направления и палеомагнитные полюса (ПНиП). Данные по СССР. Вып.6. М.1986. 38 с. Ред. Храмов А.Н.
41. Писаревский С.А. Палеомагнетизм кембрийских отложений разреза по р.Оленек. В сб. Магнитостратиграфия и палеомагнетизм осадочных и вулканогенных формаций СССР. Ред.Храмов А.Н. ВНИГРИ. Ленинград. 1986, 98 с. С.14-23.
42. Прокопьев А.В., А.К. Худолей, О.В. Королева, Г.Г. Казакова, Д.К. Лохов, С.В. Малышев, А.И. Зайцев, С.П. Роев, С.А. Сергеев, Н.Г. Бережная,

Д.А. Васильев. Раннекембрийский бимодальный вулканизм на северо-востоке Сибирского кратона. Геология и геофизика, 2016, т. 57, № 1, с. 199—224

43. Родионов В.П. Палеомагнетизм верхнего докембрия и нижнего палеозоя района р.Уджа. В сб.: Палеомагнитные методы в стратиграфии. Л., изд-во ВНИГРИ, 1984. С.18-28.

44. Розанов А.Ю., Репина Л.Н., Аполлонов М.К., Шабанов Ю.Я. и др. Кембрий Сибири. Новосибирск. Наука. 1992. С.133. Тр.ИГиГ. Вып.788.

45. 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.

46. Сидорова Э.П. Палеомагнитные исследования синийских и кембрийских отложений в районе р. Мая. В кн.: Настоящее и прошлое магнитного поля Земли. М.: Наука, 1965. С.304-309.

47. Сидорова Э.П. Результаты палеомагнитных исследований нижне- и среднекембрийских отложений рр.Лены и Олекмы. В кн.: Магнетизм горных пород и палеомагнетизм. Красноярск, Со АН СССР, 1963. С. 403-408.

48. 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.

49. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство. Пер. с нем. – М.: Мир, 1982.

50. Филиппов Ю.А. Нефтегазоносность верхнего протерозоя западной части Сибирской платформы // Диссертации на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук. Новосибирск. ИГГИГ СО РАН. 2015. 449 с.

51. 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.

52. Хоментовский В.В. Ангарий Енисейского кряжа как стандартное подразделение неопротерозоя // Геология и геофизика. 2014. Т.55. №3. С.464-472.

53. Хоментовский В.В., Карлова Г.А. Граница немакит-далдынского и томмотского ярусов (венд-кембрий) Сибири. Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2002. Т.10. №3. С. 13-34.

54. Хоментовский В.В., Карлова Г.А. Специфика экологии венд-кембрийских биот мелкораковинной фауны Сибирской платформы. Стратиграфия. Геологическая корреляция. 1994. Т.2. №3. С. 8-17.

55. Храмов А.Н., Г.И. Гончаров, Р.А. Комисарова и др. Палеомагнетизм палеозоя // тр. ВНИГРИ, вып. 335, Ленинград, Недра, 1974, 238с.

56. Храмов А.Н., Гончаров Г.И., Комиссарова Р.А. и др. Палеомагнитология. Л.: Недра. 1982. С.312.

57. Храмов А.Н., Иосифиди А.Г. Асимметрия геомагнитной полярности: экваториальный диполь, Пангея и земное ядро. Физика Земли, 2012, №1. С.30-43.

58. 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/

59. Abrajevitch, A., Van der Voo, R. 2010. Incompatible Ediacaran paleomagnetic directions suggest an equatorial geomagnetic dipole hypothesis. Earth and Planetary Science Letters, 293(1–2): 164–170.

60. Aitken, M.J., Alcock, P.A., Bussel, G.D., Shaw, C.J., 1981. Archaeomagnetic determination of the past geomagnetic intensity using ancient ceramics: allowance for anisotropy. Archaeometry, 23 (1), 53-64.

61. Akkermans, P.M.M.G., Schwartz, G.M., 2003. The Archaeology of Syria. From Complex Hunter-gatherers to Early Urban Societies (ca. 16,000–300 BC). Cambridge World Archaeology, Cambridge University Press, New York, pp. 467.
62. Aubert, J. & Wicht, J., 2004. Axial vs. equatorial dipolar dynamo models with implications for planetary magnetic fields, *Earth planet. Sci. Lett.*, 221(1–4), 409–419.
63. Aubert, J., J. M. Aurnou, and J. Wicht The magnetic structure of convection-driven numerical dynamos // *Geophys. J. Int.* 2008. V. 172. NO. 3. P. 945–956, doi:10.1111/j.1365-246X.2007.03693.x.
64. Aubert, J., Wicht, J., 2004. Axial vs equatorial dipolar dynamo models with implications for planetary magnetic fields. *Earth Planet. Sci. Lett.* 221, 409–419.
65. 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 and Planetary Science Letters* (IF = 4.61), 2016, 435, 124-135 DOI: 10.1016/j.epsl.2015.12.015
66. 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.
67. Bernbeck, J., Nieuwenhuys, O.P., 2013. Established paradigms, current disputes and emerging themes: the state of research on the Late Neolithic in Upper Mesopotamia. In: *Interpreting the Late Neolithic of Upper Mesopotamia. Publications on Archaeology of the Leiden Museum of Archaeology (PALMA)*, Brepols pub. (Turnhout, Belgium), pp. 17–37.
68. Biggin A.J., B Steinberger, J Aubert, N Suttie, R Holme, TH Torsvik. Possible links between long-term geomagnetic variations and whole-mantle convection processes. *Nature Geoscience* 5 (8), 526-533.

69. Biggin, A.J., Perrin, M. & Shaw, J., 2007. A comparison of a quasisiperpendicular method of absolute palaeointensity determination with other thermal and microwave techniques, *Earth planet. Sci. Lett.*, 257(3–4), 564–581.
70. Biggin, G. Paterson. A new set of qualitative criteria to aid inferences on paleomagnetic dipole moment variations through geological time// *frontiers in Earth Science* 2014 doi: 10.3389/ferth.2014.00024.
71. Bouligand, C., Hulot, G., Khokhlov, A., Glatzmaier, G.A., 2005.
72. Brandenburg A., Subramanian K. // *Phys. Rep.* 2005. V.417. P.1-209.
73. Butler R.F. *Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geological Terranes*. 1998. Electronic edition, <http://www.earth.rochester.edu/butlerbook/>.
74. 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 Quarter. Res.* 10.1111/j.1502-3885.2012.00248.x
75. Campbell, S., Fletcher, A., 2010. Questioning the Halaf-Ubaid transition. In: Carter, R.A., Philip, G. (Eds.), *Beyond the Ubaid: Transformation and Integration in the Late Prehistoric Societies of the Middle East*, SAOC: Studies in Ancient Oriental Civilization 63. The Oriental Institute of the University of Chicago, pp. 69–83.
76. Chauvin, A., Garcia, Y., Lanos Ph., Laubenheimer, F., 2000. Palaeointensity of the geomagnetic field recovered on archaeomagnetic sites from France. *Phys. Earth Planet. Int.*, 120, 111-136.
77. Clement, B.M., 1991. Geographical distribution of transitional VGPs: evidence for nonzonal equatorial symmetry during the Matuyama–Brunhes geomagnetic reversal. *Earth Planet. Sci. Lett.* 104, 48–58.
78. Creer K.M. Palaeozoic palaeomagnetism // *Nature*. 1968. 219, 246-250.
79. Creer K.M., Embleton B.J.J. Devonian palaeomagnetic pole for Europe and N. America // *Nature* 1967. 214. 42-43
80. 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. Sinoto , P.

Tucholka, J.F.A. Vilas. (1983), *Geophysical Journal - Royal Astronomical Society* 74 (1) , pp. 199-221;

81. Cukur D. Krastel S. Tomonaga Y. Çagatay M. N. Meydan A.F. The PaleoVan Science Team. Seismic evidence of shallow gas from Lake Van, eastern Turkey. *Marine and Petroleum Geology* 48 (2013) 341-353,

82. 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.

83. Dormy, E., Cardin, P. & Jault, D. 1998 MHD flow in a slightly differentially rotating spherical shell, with conducting inner core, in a dipolar magnetic field. *Earth Planet. Sci. Lett.* 160, 15–30. doi: 10.1016/S0012-821X(98)00078-8

84. Driscoll P. and P. Olson. Polarity reversals in geodynamo models with core evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 282(1-4):24–33.

85. Driscoll, P.E., 2016. Simulating 2 Ga of geodynamo history, *Geophys. Res. Lett.*, 43(11), 5680–5687.

86. Ernst R.E., Buchan K.L., Hamilton M.A., Okrugin A.V., Tomshin M.D. Integrated paleomagnetism and U-Pb geochronology of mafic dikes of the eastern Anabar shield region: implication for mezoproterozoic paleolatitude of Siberia and comparison with Laurentia. *Journal of Geology*. 2000. V.108. P.381-401.

87. Evans D.A., Ripperdan R.L., Kirschvink J.L. Response: Polar wander and the Cambrian. *Science*. 1998. Vol.279, p.9a. Technical comment. www.sciencemag.org.

88. Fanetti D., Anselmetti F.S., Chapron E., Sturm M., Vezzoli L. Megaturbidite deposits in the Holocene basin fill of Lake Como (Southern Alps, Italy). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 259 (2008) 323–340,

89. Finlay, C.C., 2008. Historical variation of the geomagnetic axial dipole. *Phys. Earth Planet. Inter.* 170, 1-14.

90. Gallet Y., A. Genevey, M. Le Goff, F. Fluteau, A. Eshraghi, Possible impact of the earth's magnetic field on the history of ancient civilizations, *Earth Planet. Sci. Lett.* 246, 2006, 17–26.
91. Gallet Y., Pavlov V., Courtillot V. Magnetic reversal frequency and Apparent Polar Path of the Siberian platform in the earliest Paleozoic, inferred from the Khorbusuonka river section (northeastern Siberia). *Geophysical Journal International*, 2003. V. 154. P.829-840.
92. Gallet Y., Pavlov V.E., Semikhatov M.A., Petrov P.Ju. Late Mesoproterozoic magnetostratigraphic results from Siberia: Paleogeographic implications and magnetic field behavior. // *Journal of Geophysical Research*. 2000. V.105. №B7. P.16,481-16,499 35)
93. 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.
94. Gallet, Y., Genevey, A., Courtillot, V., 2003. On the possible occurrence of 'archaeomagnetic jerks' in the geomagnetic field over the past three millennia. *Earth Planet. Sci. Lett.* 214, 237-242.
95. Gallet, Y., Molist, M., Genevey, A., Clop Garcia, X., Thébault, E. Gómez Bach, A., Le Goff, M. Robert, B., Nachasova, I., 2015. New Late Neolithic (c. 7000–5000 BC) archeointensity data from Syria. Reconstructing 9000 years of archeomagnetic field intensity variations in the Middle East. *Phys. Earth Planet. Inter.* 238, 89-103.
96. Gallet., Y., Genevey., A., Le Goff, M., Fluteau, F., Eshraghi, S.A., 2006. Possible impact of the Earth's magnetic field on the history of ancient civilizations. *Earth Planet. Sci. Lett.* 246, 17-26.
97. Gapeev, A.K. & Tselmovich, V.A., 1983. Microtexture of synthetic titanomagnetite oxidized at high partial pressures of oxygen, *Izv. Phys. Solid Earth*, 19(22), 983–986.

98. Genevey A., Gallet, Y., Thébault, E., Jesset, S., Le Goff, M., 2013. Geomagnetic field intensity variations in Western Europe over the past millennium. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 14 (8).
99. 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.
100. Genevey, A., Gallet, Y., Jesset, S., Thébault, E., Bouillon, J., Lefèvre, A., Le Goff, M., 2016. New archeointensity data from French Early Medieval pottery production (6th–10th century AD). Tracing 1500 years of geomagnetic field intensity variations in Western Europe. *Earth Planet. Sci. Lett.* 257, 205-219.
101. Genevey, A., Gallet, Y., Rosen, J., Le Goff, M., 2009. Evidence for rapid geomagnetic field intensity variations in Western Europe over the past 800 years from new archeointensity French data. *Earth Planet. Sci. Lett.* 284, 132-143.
102. Geological time scale 2012 / Eds. Felix M. Gradstein, James G. Ogg, Mark D. Schmitz, Gabi M. Ogg. 2012. V. 1.1139 p.
103. Geomagnetism. V.5 in *Treatise on Geophysics* (2nd edition). Ed. Schubert G. Elsevier. 2015. *Geophys. J. Int.*, 161, 603--626, doi: 10.1111/j.1365-246X.2005.02613.x.
104. Gilbert R., Desloges J.R, Lamoureux S.F., Serink A., Hodder K.R. / The geomorphic and paleoenvironmental record in the sediments of Atlin Lake, northern British Columbia // *Geomorphology* 79 (2006) 130–142,
105. Gissinger, C., L. Petitdemange, M. Schrinner, E. Dormy. 2012. Bistability between equatorial and axial dipoles during magnetic field reversals. arXiv:1203.4144 [physics.flu-dyn]. PACS numbers: 47.65.-d, 52.65.Kj, 91.25.
106. Gomez-Paccard M., A. Chauvin, P. Lanos, G. McIntosh, M. L. Osete, G. Catanzariti, V. C. Ruiz-Martínez, and J. I. Nuñez (2006), First archaeomagnetic secular variation curve for the Iberian Peninsula: Comparison with other data

from western Europe and with global geomagnetic field models, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 7, Q12001, doi:10.1029/2006GC001476

107. Gómez-Paccard M., Chauvin, A., Lanos, P., Thiriot, J., 2008. New archeointensity data from Spain and the geomagnetic dipole moment in western Europe over the past 2000 years. *J. Geophys. Res.* 113, B09103. doi:10.1029/2008JB005582.

108. Gubbins, D., Jones, A.L., Finlay, C.C., 2006. Fall in Earth's magnetic field is erratic. *Science* 312, 900-902.

109. Halls, H.C., Lovette, A., Hamilton, M.A., Söderlund, U. 2015. A paleomagnetic and U-Pb geochronology study of the western end of the Grenville dyke swarm: rapid changes in paleomagnetic field direction at ca. 585 Ma related to polarity reversals. *Precambrian Research*, 257, 137-166.

110. Hervé, G., Fassbinder, J., Gilder, S., Metzner-Nebelsick, C., Gallet, Y., Genevey, A., Schnepf, E., Geisweid, L., Pütz, A., Reub, S., Wittenborn, F., Flontas, A., Linke, R., Riedel, G., Walter, F., Westhausen, I., 2017. Fast geomagnetic field intensity variations between 1400 and 400 BCE: new archaeointensity data from Germany. *Phys. Earth Planet. Inter.* 270, 143-156.

111. Hofman K.A. Dipolar reversals state of the geomagnetic field and core-mantle dynamics. *Nature*. 1992. V.359. P.789-794.

112. Hofman K.A. Long-lived states of the geomagnetic field and two dynamo families. *Nature*. 1991. V.354. P.273-277.

113. <http://www.calpal-online.de/>

114. Ishihara N., S. Kida, Equatorial magnetic dipole field intensification by convection vortices in a rotating spherical shell, *Fluid Dyn. Res.* 31 (2002) 253-274.

115. 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.

116. Jones C. // *Phil. Trans. R. Soc. London. A*. 2000. V.358, P.873-897.

117. Khabarov E.M., Izokh O.P. Sedimentology and isotope geochemistry of Riphean carbonates in the Kharaulakh Range of northern East Siberia. *Russian Geology and Geophysics* 55 (2014) 629–648.
118. Khokhlov A., Shcherbakov V. Palaeointensity and Brunhespalaeomagnetic field models // *GJI*. 2015. V. 202. N 2. P. 1419-1428, doi:10.1093/gji/ggv236.
119. Kirschvink J.L., A.Ju. Rozanov Magnetostratigraphy of Lower Cambrian strata from the Siberian Platform: palaeomagnetic pole and preliminary polarity time-scale // *Geol.Mag.*, 1984, V.121 (3), p.189-203.
120. 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.541-545.
121. 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.
122. Kono M. Palaeomagnetism and palaeointensity studies of Scottish Devonian volcanic rocks // *Geophys. J. R. abstr. Soc* 1979, V56, p.385-396.
123. Kontorovich A.E., Kontorovich V.A., Saraev S.V., Filippov Y. F., Grazhdankin D.V., Fedyanin G.O., Korovnikov I.V., Kostyreva E.A., Kochnev B.B., Postnikov A.A., Terleev A.A., Gubin I.A. Upper Proterozoic – Paleozoic Fore-Yenisei Sedimentary Basin in southeastern Siberia: geology and hydrocarbon saturation // *Neoproterozoic Sedimentary Basins. Stratigraphy, Geodynamics and Petroleum Potential* (Grazhdankin D.V., Marusin V.V., eds). Novosibirsk: Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. 2011. P.43-47.
124. Kovacheva M., Boyadziev Y., Kostadinova-Avramova M., Jordanova N., Donadini F., Updated archeomagnetic data set of the past eight millenia from the Sofia laboratory, Bulgaria, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2009, vol. 10, Q05002, doi:10.1029/2008GC002347.

125. Kovacheva M., Y. Boyadziev, M. Kostadinova-Avramova, N. Jordanova and F. 2008 Donadini Updated archeomagnetic data set of the past 8 millennia from the Sofia laboratory, Bulgaria Geochemistry, Geophysics, Geosystems 10 DOI: 10.1029/2008GC002347
126. Kovacheva, M., Kostadinova-Avramova, M., Jordanova, N., Lanos, P., Boyadziev, Y., 2014. Extended and revised archaeomagnetic database and secular variation curves from Bulgaria for the last eight millennia. *Phys. Earth Planet. Inter.* 236, 79-94.
127. Krause F., Radler K.-H. Mean-field magnetohydrodynamics and dynamo theory. B.: Akad. Verlag, 1980. 271p.
128. Kuzmichev A.B., Sklyarov E.V. The Precambrian of Transangaria, Yenisei Ridge (Siberia): Neoproterozoic microcontinent, Grenville-age orogen, or re-worked margin of the Siberian craton? // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2016. V.115. P.419-441.
129. Kuznetsov V.G. Riphean Hydrocarbon Reservoirs of the Yurubchen-Tokhom Zone, Lena-Tunguska Province, NE Russia // *Journal of Petroleum Geology*. 1997. T. 20. № 4. C. 459-474.
130. Laj C., Mazaud A., Weeks R., Fuller M. and Herrero-Bervera E. Geomagnetic reversal paths (discussion). *Nature*, 1991b. V.359. P.111-112.
131. Laj, C., Mazaud, A., Weeks, R., Fuller, M., Herrero-Bervera, E., 1991a. Geomagnetic reversal paths. *Nature* 351, 447.
132. Le Goff, M., Gallet, Y., 2004. A new three-axis vibrating sample magnetometer for continuous high-temperature magnetization measurements: applications to paleo- and archeo-intensity determinations. *Earth Planet. Sci. Lett.* 229, 31-43
133. Le Goff, M., Gallet, Y., 2004. A new three-axis vibrating sample magnetometer for continuous high-temperature magnetization measurements: applications to paleo- and archeo-intensity determinations. *Earth Planet. Sci. Lett.* 229, 31e43

134. Le Goff, M., Gallet, Y., 2004. A new three-axis vibrating sample magnetometer for continuous high-temperature magnetization measurements: applications to paleo- and archeo-intensity determinations. *Earth Planet. Sci. Lett.* 229, 31-43.
135. Lhuillier, F., Hulot G., Gallet Y., 2013, Statistical properties of reversals and chrons in numerical dynamos and implications for the geodynamo, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 220, 19–36, doi:10.1016/j.pepi.2013.04.005.
136. Licht A., Hulot, G., Gallet, Y. & Thebault, E., Ensembles of low degree archeomagnetic field models for the past three millennia, *Phys. Earth planet. Inter.*, 224, 38–67, 2013.
137. Livermore, P.W., Fournier, A., Gallet, Y., 2014. Core-flow constraints on extreme archeomagnetic intensity changes. *Earth Planet. Sci. Lett.* 387, 145-156.
138. López-Sánchez J., G. McIntosh, M. L. Osete, A. del Campo, J. J. Villalain, L. Pérez, M. Kovacheva, and O. Rodríguez de la Fuente (2017), Epsilon iron oxide: Origin of the high coercivity stable low Curie temperature magnetic phase found in heated archeological materials, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 18, 2646–2656.
139. Lowrie W., Identification of ferromagnetic minerals in a rock by coercivity and unblocking temperature properties// *Geophysical research letters*, vol. 17, №2, p. 159 – 162, 1990.
140. McIntosh, G., Kovacheva, M., Catanzariti, G., Donadini, F., Lopez, M. L. O., 2011. High coercivity remanence in baked clay materials used in archeomagnetism. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 12, Q02003.
141. Meert J. and Van der Voo R. Comment on 'New palaeomagnetic result from Vendian red sediments in Cisbaikalia and the problem of the relationship of Siberia and Laurentia in the Vendian' by S. A. Pisarevsky, R.A. Komissarova and A. N. Khramov. *Geophys.J.Int.*, 2001. V. 146. Iss. 3. P. 867.
142. Meert, J., A paleomagnetic analysis of Cambrian true polar wander, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 168, 131-144, 1999.

143. Merrill R., M. McElhinny, P. McFadden, *The Magnetic Field of the Earth, Paleomagnetism, the Core and the Deep Mantle*, Academic Press, San Diego, USA, 1996, p. 531.
144. Merrill R., M. McElhinny, P. McFadden, *The Magnetic Field of the Earth, Paleomagnetism, the Core and the Deep Mantle*, Academic Press, San Diego, CA, 1996.
145. Moernaut J., Verschuren D., Charlet F., Kristen I., Fagot M., De Batist M. The seismic-stratigraphic record of lake-level fluctuations in Lake Challa: Hydrological stability and change in equatorial East Africa over the last 140 kyr. *Earth and Planetary Science Letters* 290 (2010) 214–223,
146. Morin, V. & Dormy, E., 2009. The dynamo bifurcation in rotating spherical shells, *Int. J. Mod. Phys. B*, 23(28–29), 5467–5482.
147. Munchaev, R.M., Merpert, N.J., 1981. Earliest agricultural settlements of Northern Mesopotamia. The investigation of Soviet expedition in Iraq (in Russian). Moscow, Nauka.
148. Nevanlinna, H., and L. Pesonen, Late precambrian Keweenawan asymmetric polarities as analyzed by axial offset dipole geomagnetic models, *J. Geophys. Res.*, 1983, 88, 645-658.
149. Nieuwenhuyse, O., Akkermans, P., van der Plicht, J., 2010. Not so coarse, nor always plain -the earliest pottery of Syria. *Antiquity* 84, 71-85.
150. 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.
151. Nilsson, A., Holme, R., Korte, M., Suttie, N., Hill, M., 2014. Reconstructing Holocene geomagnetic field variation: New methods, models and implications, *Geophys. J. Int.* 198, 229-248.

152. Nourgaliev D. K., 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).
153. Nourgaliev D. K., 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).
154. Ojala, A., 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
155. Paterson, G.A., Tauxe, L., Biggin, A.J., Shaar, R. & Jonestrask, L.C., 2014. On improving the selection of Thellier-type paleointensity data, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 15(4), 1180–1192.
156. Pesonen L. J., Leino M. A. H., Nevanlinna H., Archaeomagnetic intensity in Finland during the last 6400 years: Evidence for a latitude-dependent nondipole field at approximately AD 500, *J. Geomagn. Geoelectr.*, 1995, vol. 47, pp. 19–40.
157. Pidgeon, R.T., O’Neil, J.R., and Silver, L.T., 1966, Uranium and Lead Isotopic Stability in a Metamict Zircon under Experimental Hydrothermal Conditions: *Science*, v. 154, p.1538–1540, doi: 10.1126/science.154.3756.1538.
158. Pisarevsky S.A., Gurevich E.L., Khramov A.N. Paleomagnetism of Lower Cambrian sediments from the Olenek river section (northern Siberia): paleopoles and the problem of magnetic polarity in the Early Cambrian. // *Geophys.J.Int.*, 1997, №.130, p.746-756.
159. Pisarevsky S.A., Komissarova R.A., Khramov A.N. Reply to comment by J. G. Meert and R. Van der Voo on 'New palaeomagnetic result from Vendian red sediments in Cisbaikalia and the problem of the relationship of Siberia and Laurentia in the Vendian'. *Geophys. J. Int.*, 2001. V. 146. Iss. 3. P. 871.
160. Pisarevsky, S. A., and M. E. McElhinny (2003b), Global Paleomagnetic visual data base developed into its visual form, *EOS*, 84(20), 45.

161. Prevot M., Camps P. Absence of preferred longitudinal sectors for poles from volcanic records of geomagnetic reversals. *Nature*.1993. V.366. P.53-57.
162. Quidelleur X., Valet J.P. Paleomagnetic records of excursions and reversals: Possible biases caused by magnetization artifacts. *Phys.Earth and Planet.Int.* 1994. V.82.P.27-48.
163. Reimer, P.J., Bard, E., Bayliss, A., Warren, J.B., Blackwell, P., Ramsey, C.B., Buck, K., Cheng, H., Edwards, L., Friedrich, M., Grootes, P.M., Guilderson, T.P., Hafliðason, H., Hajdas, I., Hatté, C., Heaton, T.J., Hoffmann, D.L., Hogg, A.G., Hughen, K.A., Kaiser, K.F., Kromer, B., Manning, S.W., Niu, M., Reimer, R.W., Richards, D.A., Scott, E.M., Southon, J.R., Staff, R.A., Turney, C.S., Van der Plicht, J., 2013. IntCal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves 0–50,000 Years cal BP. *Radiocarbon* 55 (4), 1869-1887.
164. Reshetnyak M. // *Russ. J. Earth Sci.* 2016. V.16. P.ES6003-1-7.
165. Rogers, J., Fox, J.M.W., Aitken, M.J., 1979. Magnetic anisotropy in ancient pottery. *Nature*, 277, 644-646.
166. Salnaia N., Gallet Y., Genevey A., Antipov I. New archeointensity data from Novgorod (North-Western Russia) between c. 1100 and 1700 AD. Implications for the European intensity secular variation// *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. – 2017. – V. 269. – PP. 18–28.
167. Salomy J.T., Piper J.D.A. Palaeomagnetic studies in the British Caledonides – IV Lower Devonian lavas of the Strathmore region, Scotland // *Geophys. J. R. astr. Soc* 1973, V.34, p.47-68.
168. Shaar, R., Ben-Yosef, E., Ron, H., Tauxe, L., Agnon, A., Kessel, R., 2011. Geomagnetic field intensity: how high can it get? How fast can it change? Constraints from iron-age copper-slag. *Earth Planet. Sci. Lett.* 301, 297-306.
169. Shaar, R., Tauxe, L., Ron, H., Ebert, Y., Zuckerman, S., Finkelstein, I., Agnon, A., 2016. Large geomagnetic field anomalies revealed in Bronze to Iron Age archeomagnetic data from Tel Megiddo and Tel Hazor, Israel. *Earth Planet. Sci. Lett.* 442, 173-185.

170. Shatsillo A.V., A.N. Didenko, and V.E. Pavlov Two Competing Paleomagnetic Directions in the Late Vendian: New Data for the SW Region of the Siberian Platform // Russian Journal of Earth Sciences Vol 7, No. 4, 2005.
171. Shcherbakov V.P., Sycheva N.K., Lamash B.E. Monte Carlo modelling of TRM and CRM acquisition and comparison of their properties in an ensemble of interacting SD grains // Geophys. Res. Lett. 1996. V. 26. №20. P. 2827-2830.
172. Smirnov, A. V., Tarduno J. A. Thermochemical remanent magnetization in Precambria rocks Are we sure the geomagnetic field was weak? // J. Geophys. Res. 2005. 110. B06103. doi:10.1029/2004JB003445.
173. Stacey F.D., Banerjee S.K. The physical principles of the rock magnetism. / Elsevier, Amsterdam. 1974. 195 pp.
174. Statistical paleomagnetic field modelling and dynamo numerical simulation,
175. Tauxe L., Essentials of Paleomagnetism. Univ of California Press, Mar 19, 2010-Science - 489 p.
176. Tauxe, L. & Staudigel, H., 2004. Strength of the geomagnetic field in the Cretaceous Normal Superchron: new data from submarine basaltic glass of the Troodos Ophiolite, Geochem. Geophys. Geosyst., 5(2), Q02H06, doi:10.1029/2003gc000635.
177. Tema E. Estimate of the magnetic anisotropy effect on the archaeomagnetic inclination of ancient bricks. Physics of the Earth and Planetary Interiors, Elsevier, 2009, 176 (3-4), pp.213.
178. Thellier, E. & Thellier, O., 1959. Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique, Ann. Geophys., 15, 285–376.
179. Torsvik T.H., Meert J.G., Smethurst M.A. Polar wander and the Cambrian. 1998. Science, vol.279, p.9a. Technical comment. www.sciencemag.org.
180. 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 j, P. J.A. McCausland, L. R. M. Cocks. Phanerozoic polar wander, palaeogeography and dynamics. *Earth-Science Reviews*. 2012, v.114., p.325-368.

181. Torsvik T.N., Tait J., Moralev V.M., McKerrow W.S., Sturt B.A. & Roberts D. Ordovician paleogeography of Siberia and adjacent continents. *Geological Society, London*, . v.152. p.279-287. 1995.

182. Torsvik, T.H. et al., 2012. Phanerozoic polar wander, palaeogeography and dynamics, *Earth Sci. Rev.*, 114(3–4), 325–368.

183. Tric E., Laj C., Jehanno C., Valet J.-P., Kissel C., Mazaud A. and Iaccorino S. High-resolution record of the upper Ollduvai transition from Po valley (Italy) sediments; supports for dipolar transition geometry? *Phys.Earth Plan.Interior*. 1991a; V.65. P.319-336.

184. Tric E., Laj C., Valet J.-P., Tucholka P., Paterne M., and Guichard F. The Black geomagnetic event; transitional geometry, dynamical characteristics and geomagnetic significance. *Earth Plan. Sci.Lett.*, 1991b, V.102. P.1-13.

185. 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.

186. Veitch R., I. Hedley, J. Wagner, An investigation of the intensity of the geomagnetic field during Roman times using magnetically anisotropic bricks and tiles// *Arch. Sci.* (1984) 37 359– 373.

187. Vernikovsky V.A., Vernikovskaya A.E., Wingate M.T.D., Popov N.V., Kovach V.P. The 880-864 Ma granites of the Yenisey Ridge, western Siberian margin: geochemistry, SHRIMP geochronology, and tectonic implications // *Precam. Res.* 2007. V. 154. P. 175-191.

188. Wilson, R.L., 1961. The thermal demagnetization of natural magnetic moments in rocks, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 5(1), 45–58.

189. Yoshimura H. // *Astrophys. J.* 1975. V.201. P.740-748.

190. Yutsis-Akimova, S., Gallet Y., Amirov S., 2018. Rapid geomagnetic field intensity variations in the Near East during the 6th millennium BC: New archeointensity data from Halafian site Yarim Tepe II (Northern Iraq). *Earth Planet. Sci. Lett.* 482, 201–212. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.11.013>