На правах рукописи



Жидков Григорий Викторович

Новые определения палеонапряжённости и анализ характеристик геомагнитного поля в протерозое

Специальность 1.6.9
«Геофизика»

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук

п. Борок, Ярославская область 2026

Диссертация выполнена в Геофизической обсерватории «Борок» — филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук.

Научный руководитель:

Щербаков Валерий Прохорович — доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории палеомагнетизма и физико-химических свойств горных пород Геофизической обсерватории «Борок» — филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

Ведущая организация:

Геофизическая обсерватория «Борок» — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук.

Защита состоится на заседании диссертационного совета 24.1.132.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, по адресу 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д.10, стр.1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФЗ РАН и на сайте института www.ifz.ru. Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации vak.gisnauka.ru и на сайте ИФЗ РАН www.ifz.ru.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, в одном экземпляре направлять по адресу: 123242, Москва, Большая Грузинская ул., д. 10, стр. 1, ИФЗ РАН, ученому секретарю диссертационного совета Жосткову Руслану Александровичу.

Автореферат разослан « » сентября 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

Р. А. Жостков

Общая характеристика работы

Диссертационная работа посвящена получению новых определений палеонапряжённости ($B_{др}$) геомагнитного поля по магматическим породам протерозойского возраста и анализу характеристик геомагнитного поля в протерозое на основе новых и опубликованных данных. Палеонапряжённость рассматривается в работе как один из немногих прямых источников информации о состоянии древнего геомагнитного поля и, следовательно, о долговременной эволюции геодинамо и глубинных оболочек Земли.

Актуальность темы и степень её разработанности

Актуальность исследования определяется тем, что данные о напряжённости древнего магнитного поля позволяют судить о режиме работы геодинамо, энергетическом состоянии ядра Земли и изменении магнитного экранирования поверхности планеты в геологическом прошлом [1, 2]. Особенно существенное значение такие данные имеют для протерозоя, поскольку этот интервал рассматривается как один из ключевых этапов длительной эволюции геомагнитного поля и внутреннего строения Земли.

В последние годы для протерозоя активно обсуждается возможность существования длительных интервалов пониженной дипольной напряжённости. В литературе были предложены различные интерпретации протерозойского палеомагнитного ряда, включая гипотезу о связи долговременных изменений палеонапряжённости с возможным временем формирования твёрдого внутреннего ядра Земли. Вместе с тем опубликованные данные по протерозою остаются ограниченными и крайне неравномерно распределёнными по возрасту, регионам и типам геологических объектов (рис. 1). Сравнение таких данных осложняется различиями в методиках экспериментов, критериях отбора и качестве палеомагнитного, петромагнитного и магнитоминералогического контроля.

К настоящему времени сформированы физические и методические основы определения палеонапряжённости, разработаны методы Телье, Вилсона, Шоу и их модификации, предложены процедуры контроля лабораторных изменений магнитных минералов и статистические критерии качества определений [3, 4]. Существенный вклад в развитие области внесли глобальные базы данных по палеонапряжённости, прежде всего PINT и российская мировая база данных по палеонапряжённости, поддерживаемая в Геофизической обсерватории «Борок» ИФЗ РАН [5–7]. Эти базы позволяют переходить от рассмотрения отдельных определений к анализу долговременных закономерностей изменения виртуального дипольного момента Земли.

Несмотря на достигнутый прогресс, современная картина эволюции геомагнитного поля в протерозое остаётся фрагментарной. Имеющихся данных пока недостаточно для уверенной оценки долговременных изменений его интенсивности и пространственной структуры, а также для однозначной интерпретации этих изменений в контексте эволюции геодинамо. Поэтому получение новых надёжных данных по протерозойским магматическим породам

и их сопоставление с опубликованными результатами на основе единых критериев достоверности представляет собой актуальную задачу современной геофизики и палеомагнетизма [8].

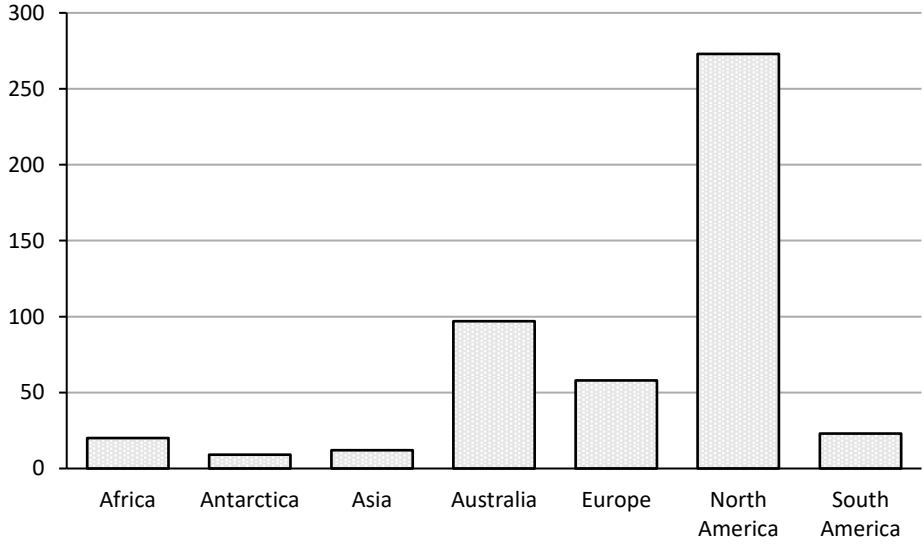


Рисунок 1. Количество определений палеонапряжённости докембрийского возраста по различным регионам.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования является геомагнитное поле в протерозое, сведения о котором получены по палеомагнитной записи магматических пород и представлены в новых и опубликованных данных по палеонапряжённости.

Предметом исследования являются величина и долговременные изменения палеонапряжённости геомагнитного поля в протерозое, возможные режимы его генерации и соответствие пространственной структуры поля гипотезе геоцентрического осевого диполя.

Цель и задачи исследования

Целью исследования является реконструкция особенностей изменения палеонапряжённости геомагнитного поля в протерозое на основе получения новых определений по протерозойским магматическим породам, их критической оценки и сопоставления с опубликованными данными.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1) проанализировать современное состояние базы данных по палеонапряжённости протерозоя и оценить степень надёжности опубликованных определений;

2) выполнить отбор протерозойских магматических объектов, перспективных для определения абсолютной палеонапряжённости;
3) провести палеомагнитные, петромагнитные и магнитоминералогические исследования, необходимые для оценки природы и сохранности естественной остаточной намагниченности исследованных пород;
4) установить пригодность изученных пород для экспериментов по определению палеонапряжённости на основе совокупности геологических, палеомагнитных и петромагнитных данных;
5) получить новые определения абсолютной палеонапряжённости по выбранным протерозойским объектам с использованием комплекса современных экспериментальных методов;
6) сопоставить полученные результаты с ранее опубликованными данными по протерозою и выявить общие закономерности изменения палеонапряжённости геомагнитного поля;
7) проанализировать значение полученных данных для реконструкции режима работы геодинамо и эволюции магнитного поля Земли в протерозое.

Фактический материал, методология и методы исследования

Фактическую основу работы составили результаты палеомагнитных, петромагнитных и магнитоминералогических исследований протерозойских магматических пород различного возраста и региональной принадлежности, а также опубликованные определения палеонапряжённости, использованные при обобщающем анализе. В работе рассмотрены объекты палеопротерозойского, мезопротерозойского и неопротерозойского возраста, включая дайки, силлы, интрузивные и вулканические комплексы древних кратонов и платформенных областей. Такой набор объектов позволил сопоставить определения палеонапряжённости, полученные для разных интервалов протерозоя, и оценить их значение для реконструкции долговременного поведения геомагнитного поля.

Методологическую основу исследования составил комплексный подход к определению и интерпретации палеонапряжённости геомагнитного поля. Величина древнего магнитного поля рассматривалась не как результат отдельного лабораторного измерения, а как итог последовательной оценки геологической обоснованности, палеомагнитной, петромагнитной и магнитоминералогической пригодности исследуемого материала. Особое внимание уделялось выделению характеристической компоненты естественной остаточной намагниченности, обоснованию её возможной первичности, контролю устойчивости магнитных минералов при экспериментальных нагревах и отбраковке результатов, не удовлетворяющих критериям надёжности.

Основным экспериментальным методом определения палеонапряжённости являлся метод Телье–Коу. В сопоставимом объёме применялся метод Вилсона, использованный для контроля и дополнения результатов основного метода. Для оценки качества определений использовались проверочные измерения парциальных термоостаточных намагниченностей — чек-точки *pTRM*, анализ диаграмм Араи–Нагата, оценка линейности выбранных участков и

статистические параметры качества. Дополнительно применялись петромагнитные и магнитоминералогические методы, включая термомагнитный анализ по ступенчатым кривым намагниченности насыщения $M_s(T_i)$, оценку доменного состояния по гистерезисным параметрам и величине *pTRM*-хвостов.

Интерпретация полученных значений выполнялась с учётом геологического возраста объектов, данных о палеомагнитных направлениях, надёжности выделения характеристической компоненты естественной остаточной намагниченности, обоснованности её первичности и сопоставления с опубликованными определениями. Для приведения локальных значений палеонапряжённости, полученных при разных палеоширотах, к сопоставимой величине рассчитывался виртуальный дипольный момент Земли (*VDM*).

Научная новизна

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1) представлено 44 новых определения палеонапряжённости геомагнитного поля на образцах магматических пород палео-, мезо- и неопротерозойского возраста, прошедших комплексную палеомагнитную, петромагнитную и магнитоминералогическую проверку; полученные результаты удовлетворяют современным критериям надёжности и существенно расширяют мировую базу данных по палеонапряжённости протерозоя;
2) обоснована гипотеза о существовании в протерозое двух чередующихся режимов генерации геомагнитного поля — слабого и сильного;
3) выполнен тест на дипольность геомагнитного поля в протерозое на основе совместного анализа определений палеонапряжённости и наклонения, имеющихся в мировой базе данных по палеонапряжённости;
4) впервые на основе данных по магматическим породам установлено, что для протерозоя, за исключением эдиакария, зависимость палеонапряжённости от наклонения (параметра $a(I)$) согласуется с преимущественно дипольной геометрией геомагнитного поля как при слабом, так и при сильном режиме его генерации. Для эдиакария такая зависимость не выявлена, что не позволяет распространить на этот интервал вывод о преимущественно дипольной геометрии поля.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость работы состоит в получении новых надёжных данных о палеонапряжённости геомагнитного поля в протерозое и в их использовании для уточнения представлений о долговременной эволюции геодинамо Земли. Проведённое исследование расширяет фактическую основу для обсуждения возрастных изменений палеонапряжённости в протерозое и позволяет более критично оценивать существующие реконструкции ранней истории магнитного поля Земли.

Практическая значимость работы определяется тем, что в ней реализован комплексный подход к исследованию протерозойских магматических пород как потенциальных носителей информации о древней напряжённости геомагнитного поля. Подход, основанный на совместном использовании палеомагнитных,

петромагнитных и магнитоминералогических критериев, может применяться при выборе объектов для дальнейших определений палеонапряжённости и при оценке достоверности получаемых результатов. Полученные данные могут быть использованы при дальнейшем развитии баз данных по палеонапряжённости, а также в исследованиях структуры геомагнитного поля в геологическом прошлом, эволюции внутреннего строения Земли и применимости гипотезы геоцентрического осевого диполя, лежащей в основе палеотектонических построений по палеомагнитным данным.

Положения, выносимые на защиту

1) Детальные исследования палеонапряжённости на вулканических породах Волынской базальтовой провинции Украинского щита показали, что геомагнитное поле в эдиакарии характеризуется ультранизкой палеонапряжённостью. Эти результаты подтверждаются независимыми данными по другим эдиакарским объектам, что в совокупности создаёт представление об эдиакарии как об интервале крайне слабого геомагнитного поля.
2) Показано, что низкие значения палеонапряжённости и виртуального дипольного момента в протерозое фиксируются не только в эдиакарии, но и в более древних периодах протерозоя, что указывает на повторяемость состояний слабой генерации геомагнитного поля в протерозое.
3) На основе анализа распределения протерозойских определений палеонапряжённости и их кластеризации показано, что в протерозое геомагнитное поле существовало в двух чередующихся режимах, различавшихся уровнем интенсивности, — слабом и сильном.
4) Геомагнитное поле в протерозое, за исключением эдиакария, имело преимущественно дипольную геометрию.

Степень достоверности результатов

Достоверность результатов обеспечивалась многоступенчатой оценкой пригодности исследованных пород для определения палеонапряжённости. Первичность и сохранность естественной остаточной намагниченности оценивались по устойчивости выделяемых компонент при размагничивании, их согласованности с геологическими и палеомагнитными данными, а также по результатам петромагнитного и магнитоминералогического контроля. Образцы с признаками вторичного перемагничивания, нестабильности носителей намагниченности или необратимых изменений при лабораторных нагревах исключались из дальнейшего анализа.

Надёжность определений палеонапряжённости контролировалась по результатам проверочных измерений *pTRM*, линейности выбранных участков диаграмм Араи–Нагата, статистическим параметрам качества и согласованности результатов, полученных методами Телье–Коу и Вилсона. В итоговую интерпретацию включались только определения, удовлетворяющие установленным критериям отбора.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы были представлены в 14 докладах на международных и всероссийских научных конференциях, включая школы-семинары и школы-конференции по палеомагнетизму и магнетизму горных пород, Генеральные ассамблеи EGU и IUGG/IAGA и конференции «Проблемы геокосмоса» в 2004–2025 гг. Представленные доклады охватывали как отдельные экспериментальные результаты по протерозойским объектам, так и их обобщение в контексте обсуждения низких значений палеонапряжённости и эволюции геодинамо.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, в том числе 10 статей в рецензируемых научных изданиях, включённых в перечень, формируемый Минобрнауки России на основании рекомендаций ВАК и 2 работы в материалах научных конференций. В публикациях представлены результаты определения палеонапряжённости и палеомагнитных характеристик протерозойских магматических пород, а также методические и аналитические результаты диссертационного исследования. Список работ автора по теме диссертации приводится в заключительной части автореферата.

Личный вклад автора

Личный вклад автора включает проведение экспериментов по методам Телье–Коу и Вилсона, выполнение термомагнитного анализа методом ступенчатых нагревов $M_s(T_i)$, исследование доменного состояния по гистерезисным параметрам B_{cr}/B_c и M_{rs}/M_s и по термомагнитному критерию для *pTRM*-хвостов, отбраковку и статистический анализ результатов определения палеонапряжённости, а также формирование выборки опубликованных данных, проведение кластерного и корреляционного анализа и участие в интерпретации полученных результатов.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, а также списка сокращений и обозначений. Работа изложена на 205 страницах, содержит 69 рисунков и 32 таблицы. Список литературы включает 277 источников, в том числе 218 на иностранных языках.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность исследования, охарактеризована степень разработанности проблемы, сформулированы цель и задачи работы, определены фактический материал, методология и методы исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, положения, выносимые на защиту, а также сведения об апробации, публикациях, личном вкладе автора и структуре диссертации.

Глава 1. Современное состояние исследований палеонапряжённости геомагнитного поля протерозоя

Первая глава посвящена обоснованию научной постановки задачи и анализу современного состояния исследований палеонапряжённости геомагнитного поля, прежде всего для докембрия, и в особенности для протерозоя. В начале главы подчёркнуто, что реконструкция величины древнего магнитного поля является одним из немногих путей получения прямой информации о состоянии геодинамо в геологическом прошлом. Если палеомагнитные направления широко используются для палеотектонических реконструкций, то палеонапряжённость позволяет количественно оценивать силу поля и, через величину виртуального дипольного момента Земли, обсуждать режим генерации геомагнитного поля.

Показано, что данные по палеонапряжённости имеют значение не только для палеомагнетизма в узком смысле, но и для геофизики ядра и общей геодинамики Земли. Изменения интенсивности магнитного поля связываются с характером конвекции во внешнем ядре, тепловым и композиционным режимом геодинамо, а также с возможным временем зарождения твёрдого внутреннего ядра. В литературе обсуждались различные оценки времени этого события, полученные на основе термодинамических моделей ядра, однако такие оценки сильно зависят от исходных параметров моделей. Поэтому экспериментальные определения палеонапряжённости могут служить независимыми эмпирическими ограничениями при проверке сценариев эволюции глубинных оболочек Земли.

Особое внимание уделено обеспеченности фактическими данными. В работе рассмотрены две основные базы данных: международная база PINT и российская мировая база данных по палеонапряжённости, поддерживаемая в Геофизической обсерватории «Борок» ИФЗ РАН. Отмечено, что при общем количестве определений, исчисляемом тысячами, доля данных докембрийского возраста остаётся небольшой. По российской мировой базе данных для возраста старше 538 млн лет приведено 492 определения, что составляет лишь около 9 % от общего числа записей. При этом докембрий занимает основную часть геологической истории Земли, а данные по нему распределены крайне неравномерно по возрасту, регионам, типам пород и методам определения палеонапряжённости.

В главе показано, что первые определения палеонапряжённости докембрийского возраста были получены на ограниченном наборе кратонов, а в дальнейшем география исследований постепенно расширялась. Однако даже в современной базе данных значительная часть протерозойских интервалов остаётся слабо обеспеченной. Это обстоятельство принципиально важно для интерпретации: отдельные низкие или высокие значения не могут рассматриваться изолированно, без учёта качества определений, возраста объектов, первичности намагниченности и репрезентативности выборки.

Далее рассмотрены основные методы определения палеонапряжённости, представленные в мировой базе: метод Телье и его модификации, метод Вилсона, метод Шоу, *NRM*/*TRM*-подходы, микроволновые и безнагревные методы. Подчёркнуто, что наибольший вес при интерпретации обычно имеют определения, полученные методами Телье-типа, поскольку они позволяют

контролировать изменение магнитных минералов в ходе эксперимента с помощью проверочных нагревов. Вместе с тем даже метод Телье не является автоматически надёжным: качество результата зависит от термостабильности носителей намагниченности, доменной структуры, корректного выбора температурного интервала и выполнения статистических критериев отбора.

В разделе, посвящённом интерпретациям протерозойских данных, рассмотрена гипотеза слабого протерозойского диполя. Согласно этой гипотезе, в значительной части протерозоя геомагнитное поле могло характеризоваться пониженными значениями виртуального дипольного момента. Такие представления были связаны как с обобщениями опубликованных определений, так и с обсуждением возможного времени формирования внутреннего ядра Земли [9]. При этом в литературе отмечалось, что выводы о длительном слабом поле чувствительны к критериям отбора: если учитывать неоднородное качество данных и слабую обеспеченность отдельных интервалов, картина становится менее однозначной [10].

Отдельно обсуждена гипотеза геоцентрического осевого диполя (GAD), лежащая в основе большинства палеотектонических реконструкций. Для современных и фанерозойских данных её справедливость подтверждается большим объёмом наблюдений, однако для докембрия вопрос остаётся менее очевидным. В главе сформулирована логика проверки: если поле имеет преимущественно дипольную геометрию, то величина палеонапряжённости должна закономерно зависеть от параметра $a(I)$, рассчитанного по палеонаклонению. Поэтому совместный анализ $B_{\text{др}}$ и $a(I)$ может быть использован как независимый тест дипольности протерозойского поля [11]. Эта постановка задачи затем реализована в Главе 4.

По итогам первой главы сделан вывод, что имеющаяся фактическая база позволяет обсуждать долговременную эволюцию палеонапряжённости в протерозое, но остаётся недостаточной для окончательных выводов без новых надёжных определений и строгого отбора и анализа опубликованных данных. Именно этим определяется необходимость комплексного исследования новых протерозойских объектов и последующего сопоставления полученных результатов с мировой базой данных.

Глава 2. Методика исследований

Вторая глава посвящена методической основе диссертационной работы. В ней последовательно рассмотрены этапы отбора материала, предварительного палеомагнитного, петромагнитного и магнитоминералогического контроля, экспериментального определения палеонапряжённости и статистической оценки качества результатов. Главная методическая идея состоит в том, что величина древнего поля не может рассматриваться как результат отдельного измерения: она должна быть получена только после проверки природы естественной остаточной намагниченности, устойчивости её компонент и пригодности магнитных минералов к лабораторным нагревам.

На предварительном этапе для каждого объекта анализировались геологические сведения, возраст пород, палеомагнитные направления, устойчивость естественной остаточной намагниченности и петромагнитные характеристики. Выделение характеристической компоненты *NRM* выполнялось по результатам ступенчатого терморазмагничивания и/или размагничивания переменным магнитным полем. При интерпретации учитывались диаграммы Зейдервельда, кучность и согласованность направлений внутри коллекций, возможность выделения характеристической компоненты и обоснованность её первичности.

Теоретической основой определения палеонапряжённости является представление о термоостаточной намагниченности как о намагниченности, приобретаемой ферримагнитными зёрнами при охлаждении в магнитном поле. При выполнении условий линейности и независимости парциальных термоостаточных намагниченностей отношение естественной остаточной намагниченности к лабораторной TRM может быть использовано для оценки величины древнего поля. В природных породах эти условия часто нарушаются из-за многодоменности, взаимодействия зёрен и минералогических изменений при нагревах, поэтому эксперимент должен сопровождаться специальными процедурами контроля.

Основным методом в диссертационной работе был метод Телье–Коу. Он основан на последовательном сопоставлении потери *NRM* при нагревах в нулевом поле и приобретения лабораторной TRM при нагревах в известном магнитном поле. Результаты представляются на диаграммах Араи–Нагата; линейный участок такой диаграммы используется для расчёта $B_{\text{др}}$. Для повышения надёжности применялись проверочные измерения *pTRM*, позволяющие выявлять изменения способности образца приобретать термоостаточную намагниченность при повторных нагревах. Образцы с существенными изменениями *pTRM* или с нелинейными, физически неоднозначными диаграммами исключались из итоговой интерпретации.

Важным дополнительным методом был метод Вилсона, основанный на сопоставлении термокривых естественной и лабораторной термоостаточной намагниченности. Он использовался как независимый или контрольный способ оценки палеонапряжённости, особенно в случаях, когда требовалось сопоставить форму температурного разрушения *NRM* и *TRM*. Применение метода Вилсона позволяло повысить устойчивость выводов за счёт проверки результатов, полученных методом Телье–Коу, другим экспериментальным подходом.

Для оценки магнитоминералогической устойчивости применялся метод ступенчатых термокривых намагниченности насыщения $M_{\text{s}}(T_{\text{i}})$. Этот подход позволял контролировать изменение магнитных минералов при последовательных нагревах и выявлять необратимые превращения, которые могут исказить результаты определения палеонапряжённости. Дополнительно использовались гистерезисные параметры $B_{\text{cr}}/B_{\text{c}}$ и $M_{\text{rs}}/M_{\text{s}}$, а также термомагнитный критерий для *pTRM*-хвостов, позволяющие оценивать вклад одно-, псевдоодно- и многодоменных магнитных зёрен. При необходимости привлекались

дополнительные магнитоминералогические методы для уточнения состава носителей намагниченности.

Статистическая оценка качества определений включала анализ линейности выбранного участка диаграммы Араи–Нагата, доли использованной *NRM*, числа температурных точек, стандартной ошибки наклона и параметров, характеризующих успешность *pTRM*-проверок. В итоговые расчёты включались только те определения, которые удовлетворяли совокупности экспериментальных и статистических критериев. Такой подход был особенно важен для протерозойских объектов, поскольку древние породы часто подвергались вторичным изменениям и потому требуют более строгой проверки, чем молодые вулканиты.

В главе также изложена процедура расчёта виртуального дипольного момента Земли (*VDM*), необходимая для сопоставления значений палеонапряжённости, полученных при разных палеоширотах. Переход от локальных значений $B_{\text{др}}$ к *VDM* позволил рассматривать новые определения не только как характеристики отдельных объектов, но и сопоставлять их с общей совокупностью опубликованных данных по протерозою.

Отдельно рассмотрены две методические проблемы, имеющие значение для настоящего исследования: определение палеонапряжённости вторичной компоненты *NRM* и поправка на подмагничивающее поле в печи. Поскольку даже слабое неконтролируемое поле при нагревах может влиять на измеряемую намагниченность, в работе учитывалась возможность его влияния на результаты термочистки и экспериментов Телье-типа. Кроме того, специально обсуждена проблема диаграмм Араи–Нагата с двумя линейными участками. Такие диаграммы могут возникать при наличии нескольких компонент намагниченности, различающихся температурными спектрами и происхождением; поэтому их интерпретация требует осторожного сопоставления с данными терморазмагничивания, *pTRM*-проверок и магнитоминералогического контроля.

По итогам второй главы сформулирована методическая схема, использованная в последующих разделах диссертации: предварительная оценка пригодности объекта, выделение характеристической компоненты *NRM*, проведение экспериментов Телье–Коу и Вилсона, магнитоминералогический контроль устойчивости носителей намагниченности, статистическая отбраковка определений и расчёт *VDM*. Эта схема обеспечивает сопоставимость новых результатов между собой и с опубликованными определениями, включёнными в мировую базу данных.

Глава 3. Результаты определения палеонапряжённости геомагнитного поля по магматическим породам протерозоя

Третья глава является основной фактической частью диссертации. В ней представлены результаты определения палеонапряжённости по магматическим породам палео-, мезо- и неопротерозойского возраста. Рассмотрены объекты разной региональной принадлежности: Южная Африка, Кольский полуостров,

Южная Карелия, Украинский щит, Сибирская платформа, Восточная Антарктида и Волынская базальтовая провинция. Такое возрастное и географическое распределение материала позволило не ограничиваться анализом одного локального эпизода, а сопоставить новые определения с общей картиной изменения геомагнитного поля в протерозое.

Для всех объектов использовалась единая логика исследования. Сначала оценивались геологический возраст, палеомагнитные направления и возможность выделения характеристической компоненты *NRM*. Затем выполнялись петромагнитные и магнитоминералогические проверки, необходимые для оценки состава и стабильности носителей намагниченности. Только после этого результаты экспериментов по методам Телье–Коу и Вилсона рассматривались как пригодные или непригодные для расчёта $B_{\text{др}}$. Такой подход был особенно важен потому, что протерозойские породы часто содержат сложную историю вторичных изменений, а отдельные приемлемые по формальным статистическим параметрам диаграммы Араи–Нагата не всегда гарантируют физическую корректность результата.

Ниже приведена сводная таблица основных результатов главы 3. Она не заменяет подробные таблицы диссертации, где приведены параметры по отдельным образцам и сайтам, но показывает общую фактическую основу работы и масштаб полученных определений.

Результаты главы 3 обобщены по отдельным возрастным и региональным группам. Изложение построено в хронологической последовательности — от палеопротерозойских объектов к эдиакарским вулканитам, — с основным вниманием к итоговым значениям $B_{\text{др}}$ и *VDM*, объёму определений, прошедших отбор, и интерпретационному значению полученных результатов.

Отдельные объекты различаются по степени сохранности магнитной записи и по успешности экспериментальных процедур. В одних случаях надёжные определения получены только на одном сайте из исходно более широкой коллекции; в других — на серии потоков, даек или силлов. Неоднородность числа принятых определений по отдельным объектам отражает различия в сохранности палеомагнитной записи и пригодности пород для экспериментов по определению палеонапряжённости.

Таблица 1. Сводка результатов определений палеонапряжённости.

Объект	**Возраст, млн лет**	**Фактическая основа**	**$B_{др}$, мкТл**	***VDM*, $\times 10^{22}$ Ам^2**
Дайки Каапвальского кратона, Южная Африка	~1900	сайт NL28; принятые определения по долеритовой дайке	~17.9	~2.82
Интрузии Мурманского кратона, СВ Фенноскандия	~1860	8 сайтов	6.5-12.4; ср. ~9.8	1.23–2.16; ср. ~1.78
Ропручейский силл, Южная Карелия	1752	2 сайта с успешными определениями	6.8; 10.0	1.75; 2.55
Магматические комплексы Украинского щита	1746-1757	5 сайтов	3.60–9.76	0.92–2.43
Куонамская магматическая провинция, Сибирская платформа	1501 ± 3	6 сайтов, прошедших селекцию	4.7–15.6	1.21–3.85
Дайки Северного Приладожья, Южная Карелия	1453.5	4 сайта	8.1–15.9	2.00–3.76
Уджинский авлакоген, Сибирская платформа	1380	силл долеритов; 9 образцов, 30 дублей	ср. 4.54	ср. 1.11
Дайки оазиса Бангер, Восточная Антарктида	1134	15 успешных сайтов	1.2–7.8 по сайтам	0.31–2.00
Волынская базальтовая провинция, Украина	551–580	21 объект с успешными определениями	1.1–11.3 по потокам	0.15–1.94

Примечание. В таблице приведены средние значения или диапазоны по исследованным сайтам/объектам. Подробные параметры отдельных образцов и критерии качества приведены в соответствующих таблицах главы 3 диссертации.

В совокупности таблица показывает, что исследованные объекты представляют широкий возрастной диапазон протерозоя, но результаты распределены неравномерно: для части возрастов имеются одиночные или локальные определения, тогда как для эдиакария и некоторых мезопротерозойских объектов материал значительно более развернут. Поэтому дальнейшая интерпретация в главе 4 строится не на предположении о непрерывной кривой изменения поля, а на сопоставлении отдельных хорошо проверенных возрастных окон с мировой базой данных.

В разделе 3.1 рассмотрены палеопротерозойские дайки Каапвальского кратона. Исследование выполнено на материале долеритовой дайки роевого комплекса Black Hills возрастом около 1.9 млрд лет. Надёжные определения были получены для сайта NL28. Породы этого сайта показали благоприятные магнитные свойства: устойчивые термомагнитные кривые, преимущественно SD–PSD-состояние носителей намагниченности и хорошую линейность диаграмм Араи–Нагата в выбранных температурных интервалах. Полученное среднее значение $B_{\text{др}}$ составляет около 17.9 мкТл, что соответствует *VDM* порядка 2.8×10^{22} Ам^2. Этот результат не относится к ультранизким значениям, но он ниже современного уровня и важен как один из хорошо проверенных палеопротерозойских ориентиров.

Особенно существенно, что из исходно более широкой коллекции для итогового определения был принят только материал, удовлетворяющий совокупности критериев. Результат по Каапвальскому кратону основан на строгом отборе материала и представляет собой хорошо проверенную оценку интенсивности поля около 1.9 млрд лет назад, хотя получен только для одного сайта.

В разделе 3.2 представлены результаты по интрузиям Мурманского кратона возрастом около 1.86 млрд лет. Для этого объекта получены определения по восьми сайтам. Значения $B_{\text{др}}$ меняются примерно от 6.5 до 12.4 мкТл, а *VDM* — от 1.23 до 2.16×10^{22} Ам^2; средние значения составляют около 9.8 мкТл и 1.78×10^{22} Ам^2 соответственно. Важным обстоятельством является согласованность результатов, полученных методами Телье–Коу и Вилсона, а также устойчивость магнитных носителей при нагревах. Эти данные указывают на пониженную интенсивность поля в орозирии и расширяют фактическую базу для интервала около 1.86 млрд лет.

По сравнению с каапваальским объектом мурманские интрузии дают более представительную совокупность сайтов, а потому позволяют говорить не только об отдельном значении, но и о группе близких оценок. В дальнейшем эти данные используются как часть палеопротерозойского блока низких и умеренно низких *VDM*.

Раздел 3.3 посвящён Ропручейскому силлу Южной Карелии возрастом около 1752 млн лет. Палеомагнитные направления характеризуются северными склонениями и малыми наклонениями, а пригодные для оценки $B_{\text{др}}$ образцы выявлены после отбора по петромагнитным и экспериментальным критериям. Для двух сайтов получены значения $B_{\text{др}}$ около 6.8 и 10.0 мкТл, соответствующие

VDM 1.75 и 2.55×10^{22} Ам^2. Эти значения также свидетельствуют о пониженном уровне поля в статерии и согласуются с общей тенденцией к низким *VDM* в ряде протерозойских интервалов.

В разделе 3.4 рассмотрены магматические комплексы Украинского щита возрастом около 1.75 млрд лет. В исследование включены пять сайтов, относящихся к разным массивам и доменам Украинского щита. По всем пяти сайтам получены низкие значения $B_{\text{др}}$ и *VDM*: палеонапряжённость варьирует от 3.60 до 9.76 мкТл, а *VDM* — от 0.92 до 2.43×10^{22} Ам^2. Согласованность данных рентгенофазового анализа, термомагнитных измерений и оценок доменного состояния показывает, что принятые определения основаны на достаточно устойчивых носителях намагниченности. Результаты по Украинскому щиту важны как независимое подтверждение низкой палеонапряжённости в позднем палеопротерозое Восточно-Европейского кратона.

Этот блок данных важен также потому, что он связывает новые определения с ранее обсуждавшейся проблемой «слабого протерозойского диполя». Наличие низких значений на нескольких сайтах одного крупного региона делает интерпретацию устойчивее, чем в случае единичного определения, и позволяет сопоставлять результат с другими возрастными окнами протерозоя.

Раздел 3.5 посвящён вулканитам и субвулканическим телам Куонамской магматической провинции Сибирской платформы возрастом около 1501 ± 3 млн лет. Коллекция включала 102 неориентированных образца/обрезка, из которых достаточно надёжные определения были получены для 28 образцов, представленных 44 дублями, из шести сайтов. Для этой коллекции особенно важной была отбраковка: часть образцов показывала хорошее сходство некоторых термокривых, но не удовлетворяла совокупности критериев, в том числе по *pTRM*-хвостам и особенностям поведения термокривых. По принятым сайтам значения $B_{\text{др}}$ находятся в диапазоне примерно 4.7–15.6 мкТл, а *VDM* — $1.21–3.85\times10^{22}$ Ам^2. Эти результаты показывают, что в калимии могли существовать как низкие, так и более высокие значения поля, поэтому протерозойская картина не сводится к одному устойчиво слабому режиму.

Куонамский материал особенно показателен, поскольку он демонстрирует, что методическая селекция может существенно изменить интерпретацию коллекции. Не каждый образец с внешне удовлетворительной диаграммой или термокривой принимался в итог; приоритет отдавался согласованности нескольких независимых критериев. Поэтому итоговые значения по шести сайтам следует рассматривать как наиболее консервативную и проверенную часть исходной коллекции.

В разделе 3.6 рассмотрены дайки Северного Приладожья возрастом около 1453.5 млн лет. Палеомагнитная часть исследования показала наличие характеристической компоненты намагниченности и позволила рассчитать палеомагнитный полюс для изученных даек. Для сайтов, прошедших отбор, получены значения $B_{\text{др}}$ от 8.1 до 15.9 мкТл и *VDM* от 2.00 до 3.76×10^{22} Ам^2. Эти значения выше, чем для ряда других мезопротерозойских объектов, и поэтому

особенно важны для последующего вывода о возможном чередовании слабого и сильного режимов генерации геомагнитного поля.

Раздел 3.7 посвящён интрузивным телам Уджинского авлакогена Сибирской платформы возрастом около 1380 млн лет. Удовлетворительные определения удалось получить только по одному интрузивному телу — силлу долеритов в районе устья ручья Хапчаныр. По индивидуальным определениям $B_{др}$ варьирует в пределах примерно 2.21–6.66 мкТл, а среднее значение по объекту составляет 4.54 мкТл; соответствующий *VDM* равен приблизительно 1.11×10^{22} Ам^2. Низкие значения, полученные по этому объекту, являются важным аргументом в пользу того, что состояния слабого поля встречались не только в эдиакарии, но и в более древних интервалах мезопротерозоя.

В разделе 3.8 представлены результаты по дайкам оазиса Бангер в Восточной Антарктиде возрастом около 1134 млн лет. Из общей палеомагнитной коллекции были отобраны сайты с выраженной характеристической компонентой и достаточной величиной *NRM*. Успешные определения получены по породам 15 сайтов; средние по сайтам значения $B_{др}$ составляют примерно 1.2–7.8 мкТл, а *VDM* — $0.31–2.00\times10^{22}$ Ам^2. Полученные результаты соответствуют низкому и очень низкому полю. Согласованность оценок по методам Телье и Вилсона, а также магнитоминералогические проверки позволяют рассматривать эти данные как существенное дополнение к базе мезопротерозойских определений.

Данные по оазису Бангер особенно важны для вывода о повторяемости низких значений в протерозое. Они относятся к стению и показывают, что очень слабое поле не является исключительно эдиакарской особенностью. В дальнейшем этот результат используется при обсуждении чередования режимов генерации поля.

В разделе 3.9 рассмотрены вулканиты Волынской базальтовой провинции эдиакарского возраста. Этот раздел занимает особое место в главе, поскольку данные по Волынской серии относятся к интервалу, для которого в последние годы активно обсуждается эпизод крайне слабого геомагнитного поля. Всего было изучено 27 уникальных объектов, представленных потоками и туфами, и 686 образцов; успешные определения палеонапряжённости получены на 21 объекте, по 225 образцам с учётом дублей. В работе использована совокупность методов, включая Телье–Коу, микроволновый вариант метода Телье, метод Вилсона и эксперименты DHT-Шоу. Наиболее устойчивые результаты дали температурные эксперименты Телье-типа и метод Вилсона.

В отличие от многих более древних объектов, эдиакарский материал представлен разрезами и потоками, позволяющими сопоставлять результаты вдоль стратиграфической последовательности. Поэтому данные по Волынской серии имеют двойное значение: они расширяют базу абсолютных определений $B_{др}$ и одновременно дают аргумент в пользу длительности эдиакарского минимума, а не единичного кратковременного провала поля.

Средние значения $B_{др}$ для принятых объектов Волынской серии лежат в интервале примерно 1.1–11.3 мкТл, а *VDM* — $0.15–1.94\times10^{22}$ Ам^2. При этом значительная часть определений соответствует ультранизкому или очень низкому

полю. Часть высоко-Ti базальтов была исключена из итогового анализа, поскольку полученные по ним результаты не удовлетворяли совокупности критериев надёжности. В целом результаты по Волынской базальтовой провинции устойчиво указывают на крайне низкую напряжённость геомагнитного поля в интервале 551–580 млн лет.

Таким образом, материалы главы 3 показывают, что протерозойские определения палеонапряжённости существенно различаются по величине, но при этом низкие значения поля повторяются в разных возрастных интервалах и на разных континентах. Особенно важны три группы результатов: палеопротерозойские низкие значения, мезопротерозойские эпизоды низкого и более высокого поля, а также эдиакарский интервал ультранизкой палеонапряжённости. Эти данные образуют фактическую основу для анализа, выполненного в главе 4, где они сопоставлены с мировой базой данных и использованы для обсуждения режимов генерации геомагнитного поля и применимости гипотезы геоцентрического осевого диполя.

Глава 4. Анализ характеристик геомагнитного поля в протерозое

Четвёртая глава является обобщающей и интерпретационной частью диссертации. В ней новые определения, полученные по протерозойским магматическим породам и представленные в главе 3, сопоставлены с опубликованными данными мировой базы палеонапряжённости [12]. Основная задача главы состоит не в описании отдельных объектов, а в выяснении того, какую картину долговременной эволюции геомагнитного поля можно получить после применения единых критериев отбора и пересчёта локальных значений $B_{\text{др}}$ в виртуальный дипольный момент Земли *VDM*.

В разделе 4.1 выполнен анализ изменения палеонапряжённости в протерозое и обсуждается возможная связь полученных результатов с эволюцией геодинамо и временем формирования внутреннего твёрдого ядра Земли. Для сопоставления использованы только определения Телье-типа, удовлетворяющие критериям надёжности: расчёт *VDM* должен основываться не менее чем на трёх образцах, а стандартная ошибка усреднения по сайту для $B_{\text{др}}$ не должна превышать 15%. Такой отбор делает выборку более консервативной, но позволяет уменьшить влияние заведомо нестабильных и плохо воспроизводимых результатов.

После применения этих критериев для протерозойских пород в мировой совокупности остаётся 118 определений палеонапряжённости типа Телье. В настоящей работе было получено 56 определений протерозойского возраста, из которых 44 удовлетворяют критериям достоверности и включены в дальнейшее обсуждение. Значительная часть новых определений относится к области низких значений *VDM*, приблизительно в интервале $(0.3–3.9)\times10^{22}$ Ам^2, что существенно расширяет фактическую базу для анализа слабого протерозойского поля.

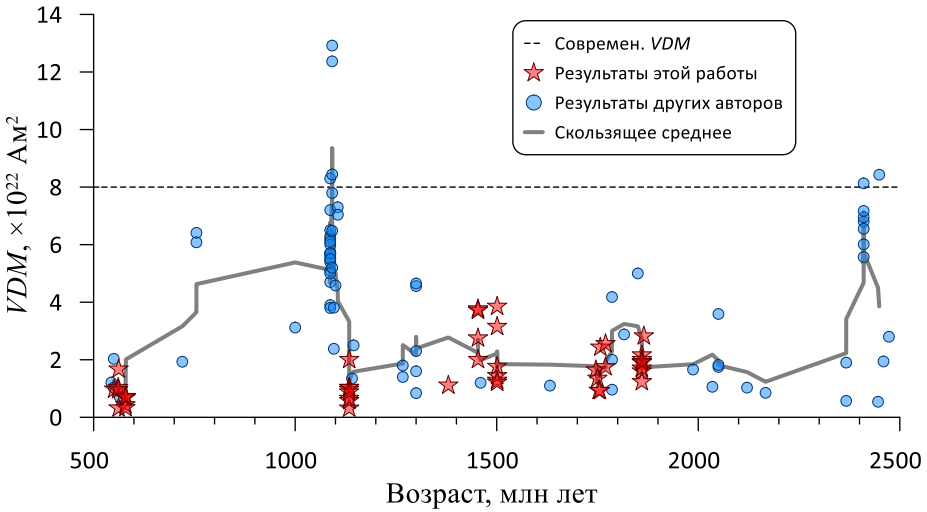


Рисунок 2. Значения *VDM* в протерозое: опубликованные данные и результаты, полученные в диссертационной работе.

Распределение значений *VDM* показывает, что низкие и ультранизкие значения не ограничены только эдиакарием [13]. Они фиксируются также в более древних интервалах протерозоя: в палеопротерозойских и мезопротерозойских объектах Восточно-Европейского кратона, Сибирской платформы и Восточной Антарктиды. Это является важным результатом, поскольку эдиакарий обычно выделяется как наиболее ярко выраженный и лучше всего обеспеченный данными интервал крайне слабого поля. Данные диссертации показывают, что состояния ослабленной генерации возникали в протерозое неоднократно.

При этом протерозойский ряд не является простым набором постоянно низких значений. Наряду с низкими *VDM* встречаются и более высокие оценки, в том числе по ряду мезопротерозойских объектов. Это позволяет рассматривать протерозойское поле как систему, в которой могли чередоваться режимы различной интенсивности. Такая интерпретация согласуется с представлением о возможной перестройке режима работы геодинамо в течение длительной эволюции ядра Земли, но требует осторожности, поскольку база данных остаётся разреженной и неоднородной по возрастам и регионам.

Особое место занимает эдиакарский интервал. Результаты по Волынской базальтовой провинции показывают ультранизкую палеонапряжённость и согласуются с независимыми данными по другим эдиакарским объектам. Поэтому эдиакарий можно рассматривать как интервал крайне слабого поля. Однако он не является единственным проявлением низкой интенсивности в протерозое, и именно это обстоятельство важно для формулировки второго защищаемого положения: низкие значения $B_{др}$ и *VDM* фиксируются не только в эдиакарии, но и в более древних периодах протерозоя.

В разделе 4.2 рассмотрена применимость гипотезы геоцентрического осевого диполя к протерозойскому полю. В основе использован подход, при котором значения палеонапряжённости $B_{др}$ сопоставляются с параметром $a(I)$, зависящим от палеонаклонения I. Для преимущественно дипольной геометрии поля между этими величинами должна проявляться линейная зависимость. Поэтому совместный анализ $B_{др}$ и $a(I)$ позволяет использовать данные по палеонапряжённости не только для оценки интенсивности, но и для проверки геометрии древнего поля.

Анализ всей докембрийской совокупности не даёт уверенного подтверждения гипотезы GAD: выявленная связь между $B_{др}$ и $a(I)$ является слабой, а объединённая выборка включает геологические интервалы, различающиеся характером поведения поля. Для формального разделения значений $B_{др}$ на кластеры слабого и сильного поля использована иерархическая кластеризация по методу Варда. В докембрийской выборке кластер высоких значений включает 84 определения и показывает слабую, но статистически значимую корреляцию, тогда как для кластера низких значений значимая связь не выявляется. Это означает, что рассмотрение всего докембрия как единой совокупности чрезмерно грубо и скрывает различия между отдельными эонами и периодами.

Иная картина получается при отдельном рассмотрении протерозоя без эдиакарских данных. В этом случае значимая зависимость между $B_{др}$ и $a(I)$ выявляется в обоих кластерах: для кластера высоких значений использовано 49 определений ($R = 0.58$; $P < 0.0001$), а для кластера низких значений — 55 определений ($R = 0.52$; $P < 0.001$). Эти значения сохраняют статистическую значимость и после поправки Бонферрони на множественное тестирование. Следовательно, протерозойское поле вне эдиакария, по-видимому, сохраняло преимущественно дипольную геометрию как в сильном, так и в слабом режиме генерации.

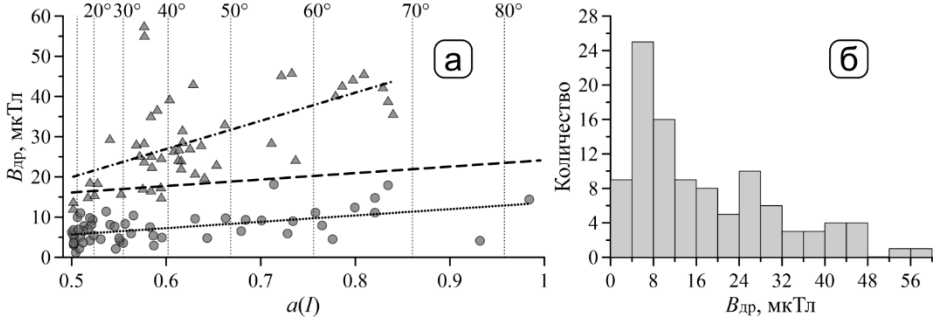


Рисунок 3. Диаграмма $B_{др}$-$a(I)$ для протерозоя без эдиакария и выделение кластеров слабого и сильного поля.

Таким образом, анализ в главе 4 позволяет разделить два вопроса, которые в обсуждении протерозойского поля часто смешиваются. Первый вопрос касается интенсивности поля: данные указывают на существование низких и более высоких значений, то есть на возможное чередование слабого и сильного режимов. Второй вопрос касается геометрии поля: для протерозоя вне эдиакария зависимость $B_{др}$ от $a(I)$ согласуется с преимущественно дипольной конфигурацией, тогда как для эдиакария такая связь статистически не подтверждается. Это позволяет выделить эдиакарий как особый интервал крайне слабого и, возможно, существенно недипольного поля, хотя имеющаяся выборка пока недостаточна для однозначного вывода о его геометрии.

Полученные результаты важны и для обсуждения возраста внутреннего ядра Земли. Низкие значения *VDM* в протерозое могут рассматриваться как одно из эмпирических ограничений для моделей эволюции геодинамо, однако имеющаяся база данных пока недостаточна для однозначной датировки возникновения внутреннего ядра. Поэтому вывод работы состоит не в утверждении конкретного возраста его формирования, а в уточнении фактической картины протерозойской палеонапряжённости, которая должна использоваться при дальнейшем сравнении с термодинамическими и численными моделями эволюции ядра.

Заключение

В диссертационной работе получены новые определения палеонапряжённости геомагнитного поля по магматическим породам палео-, мезо- и неопротерозойского возраста, выполнена их комплексная проверка и проведено сопоставление с опубликованными данными мировой базы палеонапряжённости. Основной результат работы состоит в том, что протерозойское поле не может быть описано простой схемой одного долговременного слабого интервала или единственного эдиакарского минимума. Напротив, имеющиеся данные указывают на более сложное поведение геодинамо, включавшее повторяющиеся состояния ослабленной генерации и интервалы более высокой интенсивности.

Результаты исследования показывают, что ультранизкая палеонапряжённость в эдиакарии, установленная по вулканитам Волынской базальтовой провинции, подтверждается независимыми данными по другим эдиакарским объектам. Это обосновывает первое защищаемое положение: геомагнитное поле в эдиакарии характеризовалось крайне низкой палеонапряжённостью, а сам эдиакарий выделяется как особый интервал в истории древнего магнитного поля Земли.

Вместе с тем низкие значения $B_{др}$ и *VDM* обнаружены не только в эдиакарии. Они установлены также для ряда палео- и мезопротерозойских объектов, включая материалы по Украинскому щиту, Уджинскому авлакогену, оазису Бангер и другим объектам. Это обосновывает второе защищаемое положение: состояния слабой генерации геомагнитного поля в протерозое были повторяющимися и не ограничивались эдиакарским эпизодом.

Совместный анализ протерозойских значений $B_{др}$ и параметра $a(I)$, рассчитанного по палеонаклонению, выявляет два кластера, соответствующие

слабому и сильному полю. Формальная проверка этого разделения методом иерархической кластеризации по Варду подтверждает устойчивость выделения двух групп значений $B_{др}$. Это обосновывает третье защищаемое положение: в протерозое геомагнитное поле существовало в двух чередующихся режимах, различающихся прежде всего уровнем интенсивности.

После исключения эдиакарских данных значимая зависимость между $B_{др}$ и $a(I)$ выявляется как для слабого, так и для сильного режима. Это свидетельствует в пользу преимущественно дипольной геометрии протерозойского поля вне эдиакария и обосновывает четвёртое защищаемое положение. Эдиакарий при этом остаётся особым интервалом, для которого имеющиеся данные допускают возможность существенно недипольного поведения поля или, как минимум, не позволяют уверенно распространить на него вывод о дипольности, полученный для остального протерозоя.

В целом современная картина эволюции геомагнитного поля в докембрии остаётся предварительной. Возможности её детальной интерпретации ограничены малым числом надёжных определений за огромный временной интервал. Поэтому дальнейшее развитие исследований должно быть связано с получением новых данных для слабо обеспеченных возрастов и регионов, строгим применением критериев качества, использованием более чувствительных магнитометров и развитием экспериментальных методик определения древней напряжённости геомагнитного поля.

Полученные в диссертации результаты расширяют фактическую базу по палеонапряжённости протерозоя и уточняют представления о режиме работы древнего геодинамо. Они показывают, что анализ протерозойского магнитного поля должен учитывать не только величину палеонапряжённости, но и геометрию поля, надёжность исходных данных, возрастную неоднородность выборки и особое положение эдиакарского интервала.

Публикации основных результатов диссертации в рецензируемых научных изданиях, включённых в перечень, формируемый Минобрнауки России на основании рекомендаций ВАК

1. *Shcherbakov, V. P., Zhidkov, G. V.* Multivectorial paleointensity determination by the Thellier method // J. Geophys. Res.: Solid Earth. 2006. V. 111. № 12. P. B12S32-B12S32. https://doi.org/10.1029/2006JB004504
2. *Shcherbakova, V. V., Lubnina, N. V., Shcherbakov, V. P., Mertanen, S., Zhidkov, G. V., Vasilieva, T. I., Tsel'movich, V. A.* Palaeointensity and palaeodirectional studies of early Riphaean dyke complexes in the Lake Ladoga region (Northwestern Russia) // Geophys. J. Int. 2008. V. 175. № 2. P. 433-448. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2008.03859.x
3. *Shcherbakova, V. V., Shcherbakov, V. P., Zhidkov, G. V., Lubnina, N. V.* Palaeointensity determinations on rocks from Palaeoproterozoic dykes from the Kaapvaal Craton (South Africa) // Geophys. J. Int. 2014. V. 197. № 3. P. 1371-1381. https://doi.org/10.1093/gji/ggu098
4. *Veselovskiy, R. V., Samsonov, A. V., Stepanova, A. V., Salnikova, E. B., Larionova, Y. O., Travin, A. V., Arzamastsev, A. A., Egorova, S. V., Erofeeva, K. G., Stifeeva, M. V., Shcherbakova, V. V., Shcherbakov, V. P., Zhidkov, G. V., Zakharov, V. S.* 1.86 Ga key paleomagnetic pole from the Murmansk craton intrusions - Eastern Murman Sill Province, NE Fennoscandia: Multidisciplinary approach and paleotectonic applications // Precambrian Res. 2019. V. 324. P. 126-145. https://doi.org/10.1016/J.PRECAMRES.2019.01.017
5. *Shcherbakova, V. V., Bakhmutov, V. G., Thallner, D., Shcherbakov, V. P., Zhidkov, G. V., Biggin, A. J.* Ultra-low palaeointensities from East European Craton, Ukraine support a globally anomalous palaeomagnetic field in the Ediacaran // Geophys. J. Int. 2020. V. 220. № 3. P. 1928-1946. https://doi.org/10.1093/gji/ggz566
6. *Thallner, D., Shcherbakova, V. V., Bakhmutov, V. G., Shcherbakov, V. P., Zhidkov, G. V., Poliachenko, I. B., Biggin, A. J.* New palaeodirections and palaeointensity data from extensive profiles through the Ediacaran section of the Volyn Basalt Province (NW Ukraine) // Geophys. J. Int. 2022. V. 231. № 1. P. 474-492. https://doi.org/10.1093/gji/ggac186
7. *Щербакова, В. В., Водовозов, В. Ю., Жидков, Г. В., Афиногенова, Н. А., Сальная, Н. В., Лейченков, Г. Л.* Ультранизкая напряженность геомагнитного поля в мезопротерозое по породам дайкового комплекса оазиса Бангера (1133 млн лет, Восточная Антарктида) // Физика Земли. 2022. № 6. С. 90-112. https://doi.org/10.31857/S0002333722060126
8. *Щербакова, В. В., Пасенко, А. М., Жидков, Г. В., Щербаков, В. П., Афиногенова, Н. А.* Ультранизкая напряженность геомагнитного поля в мезопротерозое по результатам исследования интрузивных тел Уджинского авлакогена Сибирской платформы возрастом 1380 млн лет // Физика Земли. 2023. № 5. С. 24-46. https://doi.org/10.31857/S0002333723050101

9. *Щербакова, В. В., Жидков, Г. В., Щербаков, В. П., Афиногенова, Н. А.* Низкое палеополе в протерозое: определение палеонапряженности на вулканитах Украинского щита возрастом 1.75 млрд лет // Физика Земли. 2024. № 4. С. 142-160. https://doi.org/10.31857/S0002333724040103
10. *Щербакова, В. В., Пасенко, А. М., Щербаков, В. П., Жидков, Г. В., Афиногенова, Н. А., Каримов, А. А.* Тестирование гипотезы о двухмодовом режиме генерации геомагнитного поля в протерозое в контексте новых экспериментальных данных о его палеонапряженности около 1500 млн лет назад // Геология и геофизика. 2025. https://doi.org/10.15372/GiG2025115

Список литературы

1. *Брагинский С.И.* О строении слоя F и причинах конвекции в ядре Земли // Докл. АН СССР. 1963. Т. 149. № 6. С. 1311–1314.
2. *Брагинский С.И.* Магнитогидродинамика земного ядра // Геомагнетизм и аэрономия. 1964. Т. 4. № 5. С. 898–916.
3. *Thellier E., Thellier O.* Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique // Ann. Geophys. 1959. V. 15. P. 285–376.
4. *Wilson R.L.* The thermal demagnetization of natural magnetic moments in rocks // Geophys. J. Int. 1961. V. 5. № 1. P. 45–58. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1961.tb02928.x.
5. *Perrin M., Shcherbakov V.* Paleointensity of the Earth's magnetic field for the past 400 Ma: Evidence for a dipole structure during the Mesozoic low // J. Geomagn. Geoelectr. 1997. V. 49. № 4. P. 601–614. https://doi.org/10.5636/jgg.49.601.
6. *Perrin M., Schnepp E.* IAGA paleointensity database: Distribution and quality of the data set // Phys. Earth Planet. Inter. 2004. V. 147. № 2-3 SPEC.ISS. P. 255–267. https://doi.org/10.1016/j.pepi.2004.06.005.
7. *Biggin A.J., Strik G.H.M.A., Langereis C.G.* The intensity of the geomagnetic field in the late-Archaean: New measurements and an analysis of the updated IAGA palaeointensity database // Earth, Planets and Space. 2009. V. 61. № 1. P. 9–22. https://doi.org/10.1186/BF03352881.
8. *Biggin A.J., Paterson G.A.* A new set of qualitative reliability criteria to aid inferences on palaeomagnetic dipole moment variations through geological time // Front. Earth Sci. 2014. V. 2. https://doi.org/10.3389/feart.2014.00024.
9. *Biggin A.J., Piispa E.J., Pesonen L.J., Holme R., Paterson G.A., Veikkolainen T., Tauxe L.* Palaeomagnetic field intensity variations suggest Mesoproterozoic inner-core nucleation // Nature. 2015. V. 526. № 7572. P. 245–248. https://doi.org/10.1038/nature15523.
10. *Smirnov A.V., Tarduno J.A., Kulakov E.V., McEnroe S.A., Bono R.K.* Palaeointensity, core thermal conductivity and the unknown age of the inner core // Geophys. J. Int. 2016. V. 205. № 2. P. 1190–1195. https://doi.org/10.1093/gji/ggw080.

11. *Lhuillier F., Shcherbakov V.P., Sycheva N.K.* Detecting dipolarity of the geomagnetic field in the paleomagnetic record // PNAS. 2023. V. 120. № 25. P. e2220887120. https://doi.org/10.1073/pnas.2220887120.

12. *Bono R.K., Paterson G.A., van der Boon A., Engbers Y.A., Michael Grappone J., Handford B., Hawkins L.M.A., Lloyd S.J., Sprain C.J., Thallner D., Biggin A.J.* The PINT database: a definitive compilation of absolute palaeomagnetic intensity determinations since 4 billion years ago // Geophys. J. Int. 2022. V. 229. № 1. P. 522–545. https://doi.org/10.1093/gji/ggab490.

13. *Lloyd S.J., Biggin A.J., Halls H., Denyszyn S.* Weak paleointensities from 1.6 Ga Greenland dykes: Further evidence for a billion-year period of paleomagnetic dipole low during the Paleoproterozoic // Earth Planet. Sci. Lett. 2024. V. 648. P. 119110.