

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Филиппович Алексей Валерьевич

**ФИЗИКО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУР
БОДРАКСКОЙ СВИТЫ С УЧЕТОМ ПАЛЕОМАГНИТНЫХ
ДАННЫХ**

25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата геолого-минералогических наук

Москва, 2022

Работа выполнена на кафедре геофизических методов исследования земной коры геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Научные
руководители:

Золотая Людмила Алексеевна, кандидат геолого-минералогических наук, доцент

Веселовский Роман Витальевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор РАН

Официальные
оппоненты:

Никишин Анатолий Михайлович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», геологический факультет, кафедра региональной геологии и истории Земли, заведующий

Иголкина Галина Валентиновна, доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, ФГБУН «Институт геофизики имени Ю.П. Булашевича» Уральского отделения РАН, лаборатория скважинной геофизики, ведущий научный сотрудник

Петров Алексей Владимирович, доктор физико-математических наук, ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе», факультет геологии и геофизики нефти и газа, кафедра геофизики, профессор

Защита диссертации состоится 25 мая 2022 года в 17:00 на заседании диссертационного совета МГУ.04.03 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, геологический факультет, ауд. 308

E-mail: dsmsu0403@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский проспект, д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/449238954/>

Автореферат разослан 22 апреля 2022 года

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор геолого-минералогических наук

В.А. Куликов

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Геологическое строение и эволюция Горного Крыма представляют большой интерес, и одним из ключевых объектов для их расшифровки являются магматические образования, которые всесторонне изучаются геологами уже не одно десятилетие. Эти исследования совершаются преимущественно методами натурных геологических наблюдений, которые не позволяют делать выводы о глубинном строении магматических тел. В практике геофизических исследований магматические объекты изучаются комплексом методов, но чаще всего методом магниторазведки, так как они имеют повышенные значения магнитных свойств по сравнению с вмещающими породами. Комплексирование магнитных исследований среднеюрских магматических образований Горного Крыма с полученными по ним же палеомагнитными данными может быть использовано для решения ряда задач, связанных с моделированием глубинного строения и выявлением особенностей генезиса конкретных магматических тел.

Палеомагнитные исследования магматических образований в Горном Крыму проводятся последние 50 лет. Их результатами являются палеотектонические реконструкции, построенные исходя из координат палеомагнитных полюсов. Методической проблемой палеомагнитных исследований в Горном Крыму является неопределенность в оценке элементов залегания и структурного положения субвулканических тел, а также немногочисленность надежных определений их изотопного возраста. Анализ выполненных палеомагнитных исследований показал, что существует проблема интерпретации направлений компонент естественной остаточной намагниченности (ЕОН) из-за сильного разброса не только между разными телами, но и в пределах конкретного тела. Кроме того, время возникновения компонент ЕОН магматических пород далеко не всегда может быть однозначно определено.

В свою очередь, материалы по комплексированию высокоточных детальных площадных магнитных съемок с петро- и палеомагнитными данными на изученной территории ранее не публиковались. В работе показано, что реализованная методика магнитного моделирования геологических разрезов, при которой параметризация магнитной модели осуществляется по экспериментальным данным об индуцированной и остаточной намагниченности пород, значительно повышает достоверность и надежность геологической интерпретации.

Объект и предмет исследования

В данной работе изучаются два объекта. Один из объектов располагается на левом борту р. Бодрак у с. Трудюлюбовка Бахчисарайского района Крыма. На этой территории площадью 0,5 км² автор выполнил детальные высокоточные магнитные съемки и отобрал представительную коллекцию из 140 образцов для последующих палеомагнитных исследований с целью изучения геологического строения пород бодракской свиты среднеюрского возраста, вмещающей субвулканические тела. Второй объект исследований – область распространения магматических пород в пределах региональной структуры, связанной с Почтовской магнитной аномалией и охватывающей площадь 200 км² в Предгорном Крыму.

Степень разработанности проблемы

Территория Горного Крыма в местах развития бодракского комплекса на протяжении длительного периода изучалась различными методами. Известны публикации о составе бодракской свиты с включением субвулканических тел в местах ее обнажений, описанных в работах В.И. Лебединского, В.С. Милеева, В.В. Юдина,

Э.М. Спиридонова, А.М. Никишина и др. Однако большая часть субвулканических тел этого комплекса не выходит на поверхность и остается совершенно неизученной. Породы бодракского субвулканического комплекса имеют переменный состав и в различной степени изменены наложенными процессами, что является следствием проявления нескольких фаз вулканической активности и последующих тектонических процессов.

Планомерное изучение геофизическими методами Крымского полуострова и прилегающих акваторий началось в 1960-х годах. Тогда были сделаны первые площадные магнитные съемки масштаба 1:50 000 под руководством А.И. Котляра (1975), на которых проявились региональные тектонические структуры, а также отдельные высокоинтенсивные, близкие к изометричным аномалии. Одна из таких аномалий в зоне сочленения Скифской плиты и Горного Крыма была названа Почтовской (или Почтовой) и располагается к северо-западу от Качинского антиклинория.

Следующий этап изучения относится к 1990-м годам, когда были предприняты первые попытки детального исследования Почтовской аномалии под руководством В.Н. Рыбакова. Они включали в себя площадные гравиметрические и магнитометрические съемки, а также сейсмический профиль МОВ ОГТ. В главный магнитный максимум была пробурена скважина, которая под мел-палеогеновым осадочным чехлом на глубине 816 м вскрыла магматические породы, представленные диоритами и диабазовыми порфиритами. Анализируя материалы предшествующих исследований, стоит отметить, что результаты интерпретации гравитационных, магнитных и сейсмических данных оказались невысокого качества. Исходные геофизические материалы не сохранились, что не позволило провести их повторную интерпретацию на современном этапе.

Более поздние геофизические работы в начале XXI века связаны с изучением крымских гравитационных и магнитных аномалий В.А. Ентиным (2010). Эти исследования, к сожалению, не дают полного понимания об источниках магнитных аномалий, несмотря на привлечение всех имеющихся ретроспективных геофизических материалов. Недавние электромагнитные исследования по профилю Ялта – Новоселовка (Десятов, 2019) выявили положение Предгорного разлома, а также некоторые особенности глубинного строения сложнопостроенного интрузивного тела, связанного с формированием Почтовской магнитной аномалии.

Цели и задачи исследования

Целью данной работы является уточнение геологического строения бодракской свиты с включением субвулканических тел среднеюрского возраста в Горном Крыму с использованием современных методов интерпретации аномальных магнитных полей и результатов магнитного моделирования. Важной особенностью диссертационной работы является методика параметризации магнитных моделей с использованием фактического материала по петро- и палеомагнитным свойствам пород бодракского комплекса.

Для достижения цели исследования были поставлены следующие задачи:

1. Провести детальный морфологический анализ магнитных полей и их трансформант по материалам площадных съемок масштабов 1:1000 и 1:2000, выполненных диссертантом, с целью изучения геологического строения площади развития пород бодракской свиты с включением субвулканических тел среднеюрского возраста в районе с. Трудолюбовка Бахчисарайского района Крыма (далее в тексте – детальный участок).

2. Отобрать на обнажениях бодракского вулканического комплекса в пределах детального участка представительную коллекцию ориентированных образцов для получения петро- и палеомагнитных характеристик.

3. Используя современную аппаратуру для лабораторных петро- и палеомагнитных исследований, выполнить измерения магнитной восприимчивости, естественной остаточной намагниченности (ЕОН) и рассмотреть особенности магнитной минералогии исследуемых пород.

4. Построить двухмерные магнитные модели геологических разрезов структур бодракской свиты с включением субвулканических тел на детальном участке.

5. Провести комплексную геологическую интерпретацию на основе морфологического анализа аномальных магнитных полей по детальному участку и Почтовской аномалии.

6. Построить прогнозные двухмерные и трехмерные магнитные модели магматического комплекса Почтовской аномалии с учетом фондовых петрофизических материалов по скважине.

Фактический материал и методы исследования

Фактический материал, положенный в основу диссертационной работы, был собран автором в течение трех полевых сезонов (2019–2021 годы) на площадях Крымского полуострова. Автор диссертации совместно с сотрудниками лаборатории магниторазведки кафедры геофизических методов исследования земной коры геологического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова выполнил площадные магнитные съемки масштабов 1:1000 и 1:2000 с использованием высокоточной магниторазведочной аппаратуры ММПОС-1. Объектом исследований для проведения съемок была выбрана площадь развития пород бодракской свиты на левом борту р. Бодрак у с. Трудолюбовка Бахчисарайского района Крыма. Автором из 10 обнажений субвулканических тел на территории исследований было отобрано 140 ориентированных в пространстве образцов для дальнейших палеомагнитных и петромагнитных лабораторных исследований, которые были выполнены в лаборатории главного геомагнитного поля и петромагнетизма ИФЗ РАН и включали в себя: определение компонентного состава естественной остаточной намагниченности (ЕОН) с помощью магнитных чисток; измерения магнитной восприимчивости образцов и ее анизотропии; определение параметров петель гистерезиса и доменного состояния магнитных минералов; электронную микроскопию магнитных минералов и петрографические описания шлифов.

Дополнительно автором был собран в большом объеме фактический геолого-геофизический материал по региональным исследованиям структуры, связанной с формированием бодракского комплекса средней юры. Были восстановлены материалы по магнитным съемкам масштаба 1:50 000 Почтовской аномалии, примыкающей к северо-западной стороне Качинского антиклинория, где на первом этапе были получены результаты детальных магнитных и палеомагнитных съемок структур бодракского комплекса. При геологической интерпретации использовались стратиграфические и петрофизические данные по скважине, пробуренной в центре Почтовской магнитной аномалии (скв. 18-А), сейсмический профиль МОВ ОГТ вкрест Почтовской аномалии, результаты 2D-инверсии данных МТЗ по профилю Ялта – Новоселовка, ретроспективные плотностные и магнитные модели.

Научная новизна исследования

Задача, поставленная в диссертации, продолжает серию научных работ, связанных с вопросами геологического и тектонического строения структур бодракской свиты средней юры. Впервые на одном из участков, где наблюдаются обнажения вулканических пород средней юры (левый борт р. Бодрак у с. Трудолюбовка), были выполнены комплексные площадные магнитные, палеомагнитные и петромагнитные

исследования. Впервые для изученной площади по результатам интерпретации магнитных полей с привлечением имеющейся априорной геологической информации представлена схема геологического строения бодракской свиты и субвулканического комплекса, отражающая также элементы разломной тектоники.

Большой вклад в изучение глубинного строения бодракского вулканогенного комплекса вносят результаты решения обратной задачи магниторазведки, позволяющие оценить глубины залегания субвулканических тел. Высокая надежность в получении автором физико-геологических моделей разрезов для площади развития структур бодракской свиты обеспечена магнитным моделированием с параметризацией магнитных моделей с использованием векторной суммы индуцированной и остаточной намагниченностей. Важно, что эти параметры задавались на основе результатов лабораторных измерений палеомагнитной коллекции из 140 ориентированных образцов, отобранных непосредственно на площади детальных исследований.

Впервые проведено обобщение региональных геологических и геофизических материалов для одной из региональных структур Крыма. Автор приводит результаты по составлению схемы геологического строения магматической структуры Почтовской аномалии, проявляющейся в потенциальных полях. Новым результатом, полученным диссертантом, на основе трехмерного и двухмерного магнитного моделирования, является глубинное строение сложнопостроенного магматического тела, пространственно связанного с Почтовской магнитной аномалией.

Личный вклад автора

Автор диссертации выполнил 6000 магнитных измерений при площадных магнитных съемках (500 тыс. м²) на левом борту р. Бодрак у с. Трудолюбовка Бахчисарайского района Крыма (детальный участок). Автором опробовано 10 субвулканических тел бодракского комплекса, из которых отобрано 140 ориентированных образцов для петро- и палеомагнитных исследований. По экспериментальным измерениям автором создана база данных из 1300 значений петро- и палеомагнитных параметров, характеризующих изученные породы бодракского комплекса. При написании работы автор выполнил полный цикл обработки и интерпретации аномальных магнитных полей и магнитного моделирования геологических разрезов на детальном участке. Автор собрал большой объем ретроспективных геолого-геофизических материалов по площади Почтовской магнитной аномалии, провел двухмерное и трехмерное моделирование и по результатам построил прогнозные геологические карты, отражающие сложное строение интрузивных тел на глубинах более 800 м.

Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с авторами, причем вклад соискателя в проведение полевых работ, обработку и анализ данных был определяющим. Также соискателем была проведена значительная работа над иллюстрациями и текстом статей, представление их в редакции журналов и переписка с редакторами и рецензентами.

Практическая и теоретическая значимость исследования

Площадь детальных исследований относится к старейшему полигону геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова – Крымскому учебно-научному центру имени профессора А.А. Богданова. Представленные автором новые материалы по интерпретации аномальных магнитных полей и их трансформант с использованием методики морфологического и линеamentного анализа позволили составить детальную схему геологического строения бодракской свиты, содержащей субвулканические тела, на левом борту р. Бодрак у с. Трудолюбовка.

Предложенная автором методика параметризации и расчета магнитных моделей с использованием экспериментальных петро- и палеомагнитных данных по индуцированной и остаточной намагниченности показала высокую эффективность при построении физико-геологических разрезов изученных комплексов средней юры.

На основании анализа систематизированных автором ретроспективных региональных геолого-геофизических материалов в области сочленения Скифской плиты и Горного Крыма (Почтовская аномалия), интерпретации различных компонент магнитного поля, построения двухмерных и трехмерных магнитных моделей, получены новые данные, позволяющие построить прогнозные геологические разрезы, охватывающие площади детальных и региональных исследований.

Результативные материалы по детальным и региональным исследованиям обладают значительной степенью новизны и вносят большой вклад в банк данных по геолого-геофизическим материалам Крыма и смогут успешно использоваться для научных и образовательных целей.

Защищаемые положения

Проведенная автором научно-исследовательская работа по теме диссертации «Физико-геологическое моделирование структур бодракской свиты с учетом палеомагнитных данных» позволяет сформулировать следующие защищаемые положения:

1. Ярко выраженные, линейные, разной интенсивности аномалии в магнитных полях на детальном участке исследований в области распространения пород бодракской свиты на левом борту р. Бодрак у с. Трудолюбовка Бахчисарайского района Крыма приурочены к субвулканическим телам бодракского комплекса. Тела имеют северо-восточное простирание, протяженность до 350 м и горизонтальные мощности, варьирующие от первых метров до 60 м.
2. На детальном участке исследований породы бодракского субвулканического комплекса средней юры по результатам их изучения лабораторными петро- и палеомагнитными методами типизированы на две группы, принципиально отличающиеся между собой скалярными магнитными характеристиками, направлением суммарной и характеристической компонент естественной остаточной намагниченности.
3. Для детального участка исследований на основании экспериментальных измерений параметров остаточной и индуцированной намагниченности пород по методике магнитного моделирования получены характеристики субвулканических тел бодракского комплекса, горизонтальная мощность которых варьирует от 9 до 60 м, а глубины залегания от приповерхностных – до 8 м.
4. Структура магнитного поля в пределах региональной Почтовской аномалии обусловлена интрузивным телом, имеющим в плане изометричную форму с поперечными размерами около 6 км, и отдельными магматическими телами, залегающими в интервале глубин от первых сотен метров до одного километра.

Степень достоверности и апробации исследования

В основу работы положены данные детальных площадных магнитных съемок, результаты сбора, анализа и интерпретации палеомагнитной коллекции 140 образцов, полученных автором в период с 2019 по 2021 год, а также фактический геолого-геофизический материал из Крымского территориального фонда геологической информации (ТФГИ). При обработке данных применялись современные методы в программных комплексах Geosoft Oasis montaj, COSCAD-3D, MagInv3D, MagInv2D, GMSYS-2D.

В ходе научных исследований автором лично и в соавторстве опубликовано шесть работ, в том числе три статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности.

Результаты диссертационной работы регулярно представлялись автором на международных и российских научных специализированных конференциях по геологии и геофизике: «EAGE. Инженерная и рудная геофизика–2019» (Геленджик, 2019), «Ломоносов-2020» (Москва, 2020), «ГеоЕвразия-2021. Геологоразведка в современных реалиях» (Москва, 2021), «Ломоносовские чтения – 2021» (Москва, 2021), «ГеоЕвразия-2022. Геолого-разведочные технологии – наука и бизнес» (Москва, 2022), «Ломоносовские чтения – 2022» (Москва, 2022).

Структура работы

Диссертация содержит введение, 5 разделов по основным этапам исследований, заключение, список литературы из 61 наименования и 1 приложение. Работа состоит из 117 страниц текста, 51 иллюстраций и 4 таблиц.

Благодарности

За высокопрофессиональное руководство и наставничество на всех этапах проведения настоящего исследования автор благодарит научных руководителей доцента Людмилу Алексеевну Золотую и профессора Романа Витальевича Веселовского. Автор признателен за предоставленные материалы по магнитным исследованиям ассистенту А.Ю. Паленову и доценту М.В. Косныревой кафедры геофизики МГУ. При написании работы большую помощь в обсуждении геологических результатов геофизических данных оказала доцент, кандидат геолого-минералогических наук Н.В. Правикова, в консультациях и формулировках по проблемам палеомагнитных измерений – И.В. Федюкин, научный сотрудник лаборатории главного геомагнитного поля и петромагнетизма ИФЗ РАН, за что автор выражает им искреннюю благодарность.

Введение

Геологическое строение Крыма и его эволюция представляют на современном этапе большой интерес. Несмотря на то что геология Крымского полуострова изучается уже не одно десятилетие, многие вопросы о строении и генезисе среднеюрских магматических образований требуют дополнительных исследований для формирования представлений об их глубинном строении.

Диссертационная работа условно может быть разделена на решение двух научных задач. Одна из них посвящена изучению области развития пород бодракской свиты с включением субвулканических тел на левом борту р. Бодрак у с. Трудолюбовка, относящейся к северо-западной части Качинского антиклинария Горного Крыма, комплексом детальных площадных магнитных съемок, петро- и палеомагнитных данных. Такой подход к комплексной геолого-геофизической интерпретации позволил автору получить детальную схему геологического строения бодракского комплекса средней юры, а также построить надежные магнитные модели разрезов бодракской свиты.

Вторая часть работы посвящена изучению региональных геофизических материалов в пределах так называемой Почтовской магнитной аномалии, на южной периферии которой располагается исследованный комплексом магнитных методов детальный участок.

С тектонической точки зрения оба объекта исследований приурочены к Предгорному разлому – шовной зоне сочленения Скифской плиты и Горного Крыма.

Раздел 1. Геология и современное состояние изученности района исследований

В истории изучения магматических образований Крыма выделяется несколько периодов, совпадающих с определенными этапами развития геологической науки в нашей стране. Широкий размах в середине прошлого века получили в Крыму геофизические исследования. Выполненные с 1960 по 1975 год магнитометрические работы на отдельных участках Крыма были обобщены А.И. Котляром (1975), и впервые опубликованы сводные карты изодинам вертикальной компоненты магнитного поля ΔZ_a Горного Крыма в масштабах 1:50 000 и 1:200 000 [Котляр, 1975]. По результатам этих работ было выделено несколько высокоинтенсивных региональных магнитных аномалий. Наибольший интерес привлекла изометричная положительная аномалия, расположенная в Бахчисарайском районе Крыма (так называемая Почтовская или Почтовая аномалия). До сих пор природа формирования этой магнитной аномалии является предметом научных дискуссий. Большинство ученых (В.В. Юдин, В.А. Ентин и др.) считают, что источником Почтовской аномалии является интрузивное тело, скрытое меловыми и палеогеновыми отложениями.

В историческом аспекте к геолого-геофизическим исследованиям Почтовской аномалии возвращались неоднократно. В 1999 году была сделана попытка детального изучения Почтовской аномалии комплексом методов потенциальных полей, профиля сейсморазведки ОГТ и бурения одной скважины в магнитный максимум с последующим петрофизическим изучением керна [Рыбаков, 1999]. Подробное описание результатов этих исследований представлено в тексте диссертации.

По литературным данным, изучаемая площадь находится в зоне сочленения Скифской плиты и Горного Крыма. В этой зоне по геологическим данным [Никишин, 2021] выделяются следующие структурные единицы: таврический комплекс (T_3-J_1), бодракская свита (J_{2bd}) с включением субвулканических образований (J_{2b}), меловые и палеогеновые отложения (K_1-P) (рис. 1).



Рис. 1. Фрагмент геологической карты Крыма [ВСЕГЕИ, 2019] (коричневым контуром отмечена площадь региональных исследований Почтовской аномалии, черным – детальный участок комплексных магнитных и палеомагнитных исследований; звездочкой – положение скважины № 18)

Таврический комплекс на площади исследований представлен эскиординской свитой – флишевыми терригенными отложениями (турбидитами) позднетриас-раннеюрского возраста, залегающими на позднепалеозойском складчатом фундаменте. Породы свиты сильно деформированы и имеют складчато-надвиговую структуру. На породах эскиординской свиты с резким угловым несогласием зале-

гают породы бодракской свиты байосского возраста. Нижний этаж свиты сложен морскими аргиллитами и отложениями кластических пород эскиординской свиты. Верхний этаж представлен вулканогенно-осадочными породами – базальтами, андезитобазальтами, туфопесчаниками и туфоалевролитами. Мощность свиты оценивается в более чем 500 м. Породы бодракской свиты на левом борту р. Бодрак у с. Трудюлюбовка сильно деформированы, предполагается преимущественно северо-западное падение. На площади детальных исследований туфопесчаники в обнажении «байосский цирк» (вблизи точки № 3 на рис. 2) залегают с углами падения 60° и азимутом СЗ 330°. Формирование пород бодракской свиты происходило в обстановке вулканической дуги – субдукции океанической коры океана Тетис под Понтиды-Крым, сопряженной с глубоким бассейном. Вулканоплутонический пояс прослеживается от Крыма до Кавказа. Ширина вулканического пояса в Крыму оценивается в 150–200 км. Породы таврического комплекса и залегающей на них бодракской свиты пронизывает большое количество субвулканических тел – даек, силлов, штоков и др. Интрузивный комплекс формировался в четыре фазы магматической активности, что отражается в его сложном строении. В районе с. Трудюлюбовка представлены жерловые и субвулканические дайки и силлы. Над вулканогенно-осадочными породами бодракской свиты и субвулканическими телами бодракского комплекса моноклинально с малыми углами падения на северо-запад (7°) залегают меловые и палеогеновые отложения, представленные мергелями и известняками.

Вопрос о времени складчатости и внедрении тел бодракского субвулканического комплекса остается дискуссионным. На данный момент складчатость считается домеловой (позднекиммерийской). Изначально В.И. Лебединский считал внедрение интрузивов доскладчатым. В более поздних исследованиях, на основе морфологии контактов, состава силлов и вмещающих пород А.В. Латышев считал их внедренными в уже дислоцированные породы. По мнению А.М. Никишина (2021), среднеюрский этап вулканизма закончился на рубеже келловея и сменился фазой складчатости, которая происходила в полосе активной континентальной окраины. По результатам анализа палеомагнитных данных А.А. Корнейко (2013) делает вывод о доскладчатом внедрении пластовых интрузий на примере «силла Короновского».

Долгое время возраст бодракского субвулканического комплекса считался байосским по единичным биостратиграфическим определениям пород в основании бодракской свиты и перекрывающих ее отложениях. Более поздние высокоразрешающие изотопные датировки, выполненные независимо М. Мейерс (2010) и Е.Б. Морозовой (2014), расширили временные границы образования вулканитов от среднеюрского до раннемелового (125.4 ± 3.7 млн лет) возраста. При этом на основании геохимических данных исследователи утверждают, что тела относятся к единому вулканическому комплексу. Мейерс М. выделила два этапа вулканизма: среднеюрского (~ 172–158 млн. лет) и верхнеюрско-нижнемелового возрастов (~ 151–142 млн лет). В работе [Meijers, 2010] делается вывод о существовании в мезозойское время трех основных тектономагматических этапов: рифтогенно-спредингового в позднетриас-раннеюрское время; островодужно-вулканоплутонического в среднеюрское время; позднеюрско-раннемелового, сопряженного с коллизийными процессами. По мнению В.В. Юдина (2017), опробованные авторами для изотопных датировок тела располагаются в меланжах или являются олистолитами и, соответственно, присваивание мелового возраста среднеюрским интрузивам некорректно. По данным Э.М. Спиридонова (2021), породы бодракского вулканического комплекса метаморфизованы, а также прорываются по трещинам многочисленными дайками более поздних этапов

активизации. Соответственно, изотопный возраст этих пород распространять на все интрузивные тела долины р. Бодрак неправильно.

Палеомагнитные исследования в Крыму проводятся уже более пятидесяти лет (К.И. Анферова (1971); Д.М. Печерский, А.Н. Диденко и В.А. Сафонов (1991, 1993); О.Б. Ямпольская (2006); В.В. Юдин (2001, 2007); М. Мейерс (2010); Р.В. Веселовский (2013)). Чаще всего их целью являлись палеотектонические реконструкции с использованием координат палеомагнитных полюсов. Однако большинство из этих работ не отвечает современным требованиям надежности (отсутствуют координаты объектов, не приводятся параметры модуля вектора остаточной намагниченности и магнитной восприимчивости пород), и их результаты не могут быть использованы для исследований. Кроме того, существенной проблемой является определение элементов залегания вмещающих пород, что важно для восстановления положения тел в момент образования и приобретения остаточной намагниченности. Также обоснованность первичности выделенных характеристических компонент ЕОН нередко дискуссионна.

Раздел 2. Описание фактического геолого-геофизического материала

В основе диссертационной работы лежит полученный автором фактический материал по высокоточным магнитным съемкам масштабов 1:1000 (350×260 м) и 1:2000 (1050×320 м) (рис. 2). Шаг между профилями составил 10 и 20 м, по профилю 2.5 и 5 м соответственно. Учет солнечного-суточных вариаций производился с помощью магнитовариационной станции.

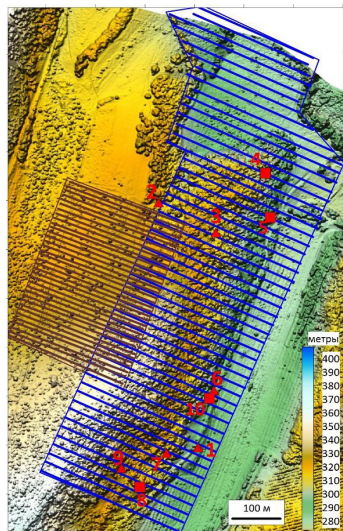


Рис. 2. Карта цифровой модели местности (рельеф) и схема профилей площадных магнитных съемок. Коричневый цвет – съемка масштаба 1:1000, синий – 1:2000. Числами обозначены места отбора образцов палеомагнитной коллекции, красные треугольники – проведен петрографический анализ

Перед стадией интерпретационных работ был выполнен стандартный граф обработки измерений модуля полного вектора магнитной индукции T , построены карты аномальных значений ΔT и оценена точность съемки, которая для всей площади составила ± 3 нТл. На обнажениях магматических пород автором выполнена каппаметрическая съемка, съемка цифровой модели местности (ЦММ) с БПЛА, характеризующая сильные перепады рельефа, и аэрофотоснимки территории. Высокая точность площадной магнитной съемки позволила построить сечение изодинам через 10 нТл и выявить не только высокоинтенсивные аномалии, но и тонкую структуру аномального магнитного поля в области распространения слабых аномалий (см. раздел 4).

В 2020 году на площади детальных магнитных съемок из 10 обнажений автором была отобрана палеомагнитная коллекция из 140 ориентированных в пространстве образцов бодракского комплекса. В разделе 3 подробно описаны лабораторные петро- и палеомагнитные исследования этой коллекции, проведенные в лаборатории главного геомагнитного поля Земли и петромагнетизма ИФЗ РАН. Перед началом лабораторных исследований из штуфов были выпилены образцы кубической формы с длиной ребра 2 или 1 см.

Раздел 3. Лабораторные петромагнитные, палеомагнитные и петрографические исследования¹

В разделе 3 приводятся результаты детальных петро- и палеомагнитных исследований, выполненных автором на 140 образцах, отобранных из тел бодракского субвулканического комплекса, обнажающихся в среднем течении р. Бодрак. В рамках диссертации автором был проведен комплекс лабораторных исследований: 1) измерения магнитной восприимчивости и ее анизотропии на каппабридже MFK1-FA (рис. 3, а); 2) изучение параметров петли магнитного гистерезиса и величины остаточной коэрцитивной силы на вибромагнитометре PMC MicroMag 3900 (рис. 4); 3) термомагнитный анализ – определение минералов носителей намагниченности – на вибромагнитометре конструкции Ю.К. Виноградова (рис. 3, в); 4) изучение компонентного состава вектора естественной остаточной намагниченности (ЕОН) с помощью магнитных чисток образцов переменным магнитным полем на криогенном (SQUID) магнитометре 2G Enterprises (рис. 3, б; 5) электронная микроскопия образцов с помощью СЭМ TESCAN MIRA LMS.

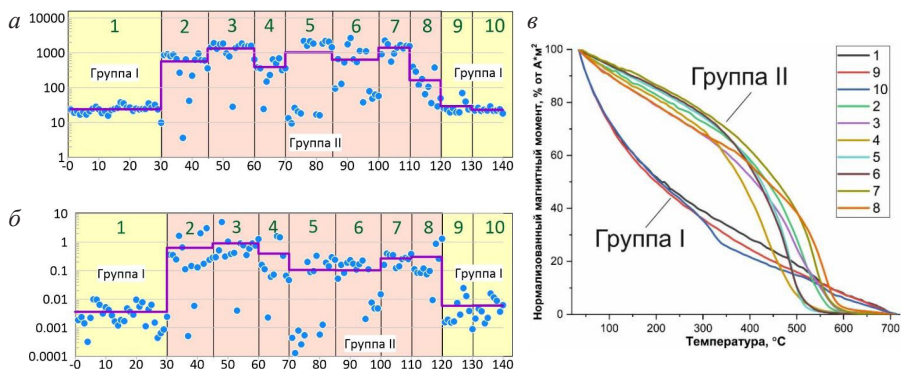


Рис. 3. Анализ измерений: а) k (10^{-5} ед. СИ) для коллекции из 140 образцов (по горизонтальной оси отложен номер образца, сверху подписаны номера обнажений, по вертикальной оси отложены значения k в логарифмическом масштабе, фиолетовая линия – среднее значение по обнажению); б) модуля суммарного вектора ЕОН (J_n , А/м) 140 образцов; в) результаты термомагнитного анализа для образцов из 10 обнажений

По результатам палеомагнитных и петромагнитных исследований бодракского субвулканического комплекса удалось уверенно выделить две группы магматических тел. К первой группе отнесены породы из трех обнажений – № 1, 9, 10 (рис. 2), пространственно попадающие в контуры «силла Короновского». Породы этой группы характеризуются низкими значениями магнитной восприимчивости (k) от

¹ При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

1. Комплексный анализ аномальных магнитных полей и палеомагнитных данных в юго-западной части Качинского антиклинория Крыма / Филиппович А.В., Золотая Л.А., Веселовский Р.В., Федюкин И.В. // Геофизика. – 2021. – № 4. – С. 57–70. RSCI (0.88 п.л., авторский вклад – 80%). Им-пакт-фактор РИНЦ, 2019: 0.377.

2. Анализ результатов лабораторных методов определения магнитных свойств магматических пород бодракской свиты / Филиппович А.В., Золотая Л.А., Федюкин И.В. // Сборник «Ломоносовские чтения». Секция «Геология». – 2021. – С. 9–11 (0.19 п.л., авторский вклад – 80%).

$11 \cdot 10^{-5}$ до $70 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ (среднее $26 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ) и низкими значениями модуля вектора ЕОН (J_n) от $0.3 \cdot 10^{-3}$ до $20.0 \cdot 10^{-3}$ А/м (среднее $4.0 \cdot 10^{-3}$ А/м) (рис. 3, а, б). В данной группе петли гистерезиса имеют узкую форму – значение магнитного момента прямо пропорционально величине приложенного магнитного поля (отсутствует эффект магнитного насыщения), что позволяет сделать вывод о преобладании в этой группе ансамбля парамагнитных минералов (рис. 4, а).

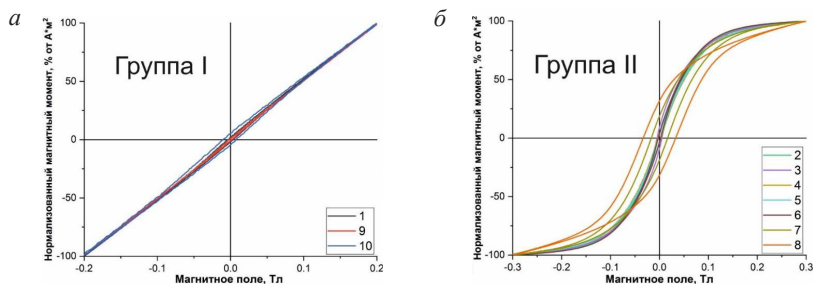


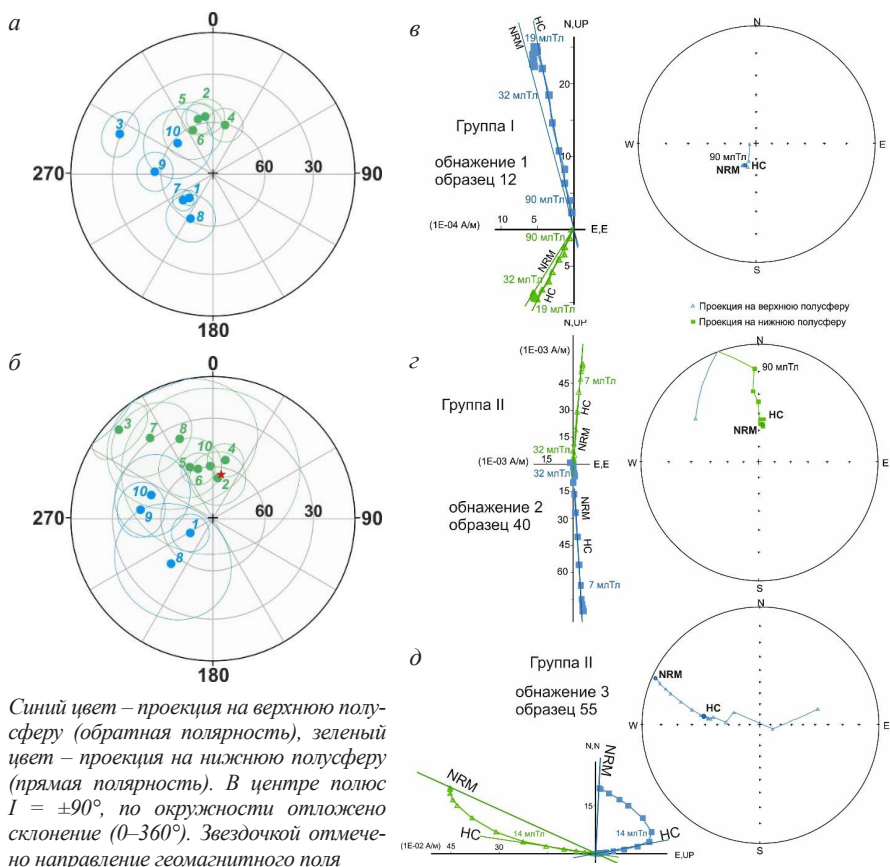
Рис. 4. Диаграмма зависимости магнитного момента образцов от приложенного внешнего магнитного поля: а) для первой группы и б) для второй группы образцов. Обнажения обозначены разными цветами

Предполагается, что в образцах этих пород присутствуют ферромагнитные минералы, обнаруживающиеся при очень слабых намагничивающих полях до 0.020–0.030 Тл. По результатам термомагнитного анализа кривая зависимости намагниченности насыщения от температуры имеет вогнутую форму без выраженных участков перегиба, и только при расчете второй производной отмечаются максимумы в диапазоне температур 330–350 °С и 550–570 °С. По данным диапазонам уменьшения намагниченности насыщения можно предположить наличие сульфидов железа и низкотитанистого титаномагнетита, соответственно.

Важный вывод получен автором по результатам компонентного анализа векторов ЕОН магнитных чисток (рис. 5). На рис. 5 представлены стереограммы распределения наиболее стабильной (древней) (рис. 5, а) и суммарной (рис. 5, б) компонент вектора ЕОН. Образцы из первой группы обнажений (№ 1, 9, 10) характеризуются обратной полярностью наиболее стабильной компоненты ЕОН; направление суммарного вектора ЕОН практически совпадает с направлением характеристической компоненты. Можно предположить, что тела образовались в эпоху обратной полярности (рис. 5, в). Полученный результат совпадает с выводом А.А. Корнейко и Р.В. Веселовского (2013) о том, что среднее направление стабильной компоненты намагниченности «силла Короновского» имеет обратную полярность.

Вторая группа включает в себя семь обнажений (№ 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8), породы которых характеризуются повышенными значениями k от $100 \cdot 10^{-5}$ до $2640 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ (среднее $1033 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ) и разбросом значений модуля вектора ЕОН от $40 \cdot 10^{-3}$ до $4920 \cdot 10^{-3}$ А/м (среднее $420 \cdot 10^{-3}$ А/м) (рис. 3, а, б). Форма петель гистерезиса узкая, с перегибом ближе к значениям насыщения и характерна для ферромагнитных минералов преимущественно титаномагнетитового ряда (рис. 4, б). По результатам термомагнитного анализа кривая магнитного момента насыщения для второй группы имеет выпуклую форму с ярко выраженным участком перегиба в диапазоне температур 530–580 °С (рис. 3, в). Данный диапазон температур характерен для магнетита или титаномагнетита с низкими содержаниями титана.

По результатам компонентного анализа векторов ЕОН магнитных чисток у тел из второй группы (№ 2, 4, 5, 6, 8) направление суммарного вектора имеет прямую полярность (рис. 5, а) и практически совпадает с направлением наиболее стабильной компоненты ЕОН (рис. 5, б, в). К данному типу относится преобладающее количество изученных образцов.



Синий цвет – проекция на верхнюю полу-сферу (обратная полярность), зеленый цвет – проекция на нижнюю полу-сферу (прямая полярность). В центре полюс $I = \pm 90^\circ$, по окружности отложено склонение ($0-360^\circ$). Звездочкой отмечено направление геомагнитного поля

Рис. 5: а) стереограмма распределения наиболее стабильной компоненты ЕОН; б) стерео-грамма распределения суммарной компоненты ЕОН; диаграммы Зийдвервея и стерео-граммы в географической системе координат типичных образцов; в) обнажение 1, образец № 12; г) обнажение 2, образец № 40; д) обнажение 3, образец № 55

В этой группе образцы из обнажений 3 и 7 имеют отличительные характеристики, выражающиеся в низких значениях наклонений суммарного вектора ЕОН (рис. 5, б). Направление суммарного вектора отличается от наиболее стабильной компоненты вектора ЕОН, вектор в ходе ступенчатого размагничивания движется по дуге большого круга (рис. 5, д). Наиболее вероятная интерпретация заключается в том, что субвулканические тела образовались в эпоху обратной полярности и в последующей геологической истории были перемагничены.

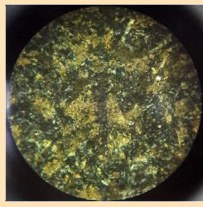
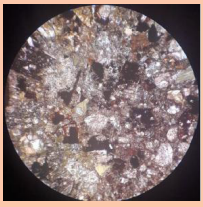
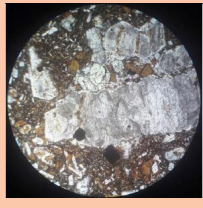
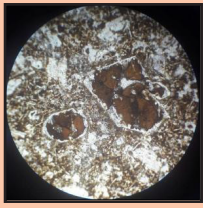
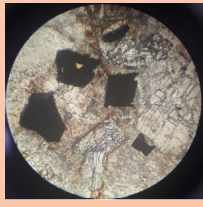
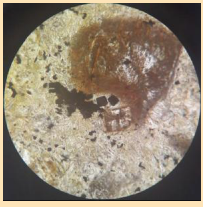
Для подтверждения первичности выделенных компонент на сканирующем электронном микроскопе были проанализированы шлифы из обнажений 1 и 6. Установлено, что в образце из обнажения 1 зерна титаномагнетита субмикронного размера сохранились в неизменном виде в силикатной матрице, что является доводом в пользу первичности палеомагнитной записи. Зерна титаномагнетита в образце из обнажения 6 имеют размеры в десятки микрон и сильно изменены наложенными процессами, что свидетельствует в пользу вторичной природы, связанной с ними стабильной компоненты намагниченности.

Возможная интерпретация различных направлений характеристической компоненты ЕОН в изученных телах: все субвулканические тела образовались в эпоху обратной полярности. Впоследствии часть тел была перемагничена в меловое время и поэтому характеризуется прямой полярностью стабильной компоненты ЕОН.

Петрографическое описание шлифов показало (табл. 1), что породы бодракско-го субвулканического комплекса представлены в основном базальтами и долеритами, в разной степени измененными наложенными процессами.

Таблица 1. Петрография шлифов и магнитные свойства образцов.

D – склонение, I – наклонение, J_n – модуль вектора ЕОН в А/м, k – магнитная восприимчивость в 10^{-5} ед. СИ. Цвет – разделение по группам

Фото шлифа	Описание, магн. парам.	Фото шлифа	Описание, магн. парам.
	1-22. Измененный габбро порфировый, массивный. $D = 191^\circ$, $I = -70^\circ$, $J_n = 0.01$, $k = 25$		2-31. Туфопесчаник средне-, мелко- и тонкозернистый, слоистый. $D = 3$, $I = 70$, $J_n = 0.34$, $k = 859$
	3-57. Измененный базальт порфировый, массивный, миндалекаменный. $D = 294$, $I = -2$, $J_n = 0.55$, $k = 1528$		6-87. Измененный биотитсодержащий базальт порфировый, массивный, миндалекаменный. $D = 20$, $I = 77$, $J_n = 0.15$, $k = 654$
	7-101. Измененный долерит с офитовой, местами долеритовой структурой и массивной текстурой. $D = 308$, $I = -81$, $J_n = 0.13$, $k = 916$		9-122. Измененный базальт порфировый, массивный, миндалекаменный. $D = 242$, $I = -44$, $J_n = 0.01$, $k = 24$

В конце раздела автор делает выводы по всему объему полученных петромагнитных и палеомагнитных характеристик изученной коллекции образцов. Полученные данные легли в основу магнитного моделирования геологических разрезов бодракской свиты (раздел 4).

Раздел 4. Морфологический анализ магнитных полей и результаты геологической интерпретации на детальном участке исследований²

В разделе 4 подробно описывается поэтапная интерпретационная обработка площадных магнитных съемок. Автор приводит сводную карту магнитных аномалий ΔT_a для изученного detailного участка исследований на левом борту р. Бодрак у с. Трудюлюбовка, площадь которого составляет 0.5 км^2 . В значениях ΔT_a учтены поправки за нормальное геомагнитное поле ($T_0 = 49636 \text{ нТл}$), солнечно-суточные вариации и полиномиальный региональный фон (рис. 7, а).

Для последующей геолого-геофизической интерпретации изученного detailного участка исследований в программе Geosoft Oasis montaj были рассчитаны трансформации магнитного поля: редукция к магнитному полюсу, частотные составляющие (региональная, среднечастотная и локальная компоненты), вертикальная производная (рис. 7, б), полный горизонтальный градиент (рис. 7, в), аналитический сигнал. Дополнительно в программе КОСКАД-3D (А.В. Петров) выполнена трассировка осей аномалий и кластерный анализ. Использование такого подхода позволяет контрастно подчеркнуть разноглубинные объекты, границы тел, а также структурные особенности, связанные с тектоническими нарушениями.

В качестве примера на рис. 6 проиллюстрирован линеаментный анализ морфологии аномального магнитного поля и его трансформант на одной из ярко выраженных линейных магнитных аномалий.

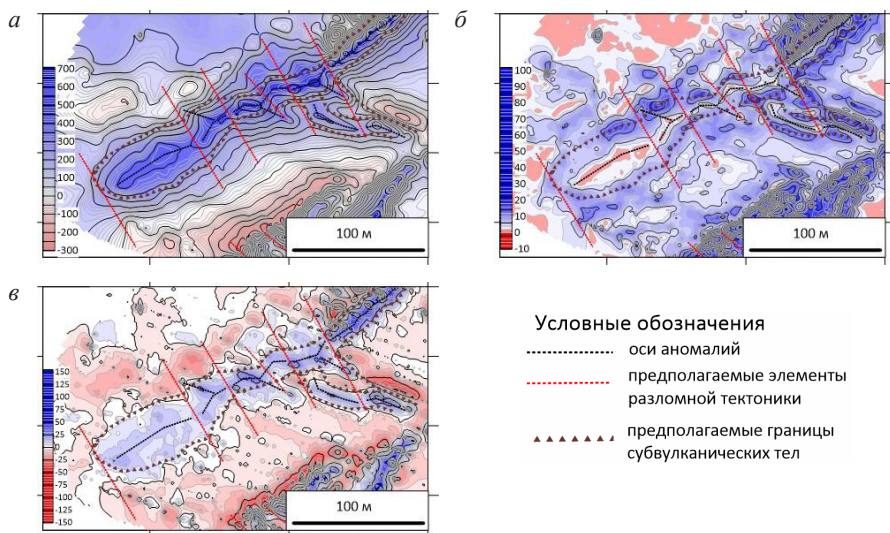


Рис. 6. Пример морфологического анализа аномального магнитного поля и его трансформант на фрагменте площади: а) аномальное магнитное поле (нТл); б) полный горизонтальный градиент магнитного поля (нТл/м); в) вертикальная производная магнитного поля (нТл/м)

² При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

1. Комплексный анализ аномальных магнитных полей и палеомагнитных данных в юго-западной части Качинского антиклинария Крыма / Филиппович А.В., Золотая Л.А., Веселовский Р.В., Федюкин И.В. // Геофизика. – 2021. – № 4. – С. 57–70. RSCI (0.88 п.л., авторский вклад – 80%). Им-пакт-фактор РИНЦ, 2019: 0.377.

При проведении анализа автор разделил линеаменты на три типа:

- 1) оси локальных аномалий, которые четко проявляются на карте вертикальной производной магнитного поля;
- 2) зоны смещения осей локальных аномалий, а также изменение амплитуды и ширины аномалий, которые можно соотнести с положением разломов;
- 3) зоны максимального горизонтального градиента аномального магнитного поля, которые оконтуривают интрузивные тела.

Проведенный анализ позволил оконтурить границы отдельных блоков протяженной линейной магнитной аномалии северо-восточного простирания, соответствующей субвулканическому сложнопостроенному телу с элементами разломной тектоники преимущественно северо-западного простирания.

Вышеописанная методика детального морфологического анализа всех карт аномальных магнитных полей и их трансформаций легла в основу построения схемы геологического строения бодракского комплекса на детальном участке с координатной привязкой к цифровой модели местности и изученным обнажениям (рис. 7, з). Автор выделил на результативной геологической схеме следующие области: 1) на востоке-юго-востоке – зона распространения слабомагнитных пород эскиординской свиты (J_{1es}); 2) северо-западнее выделяется широкая полоса (500–700 м) развития пород бодракской свиты (J_{2bd}), которую можно подразделить на два структурных этажа – авулканогенный слабомагнитный нижний (J_{2bd1}) и вулканогенный магнитный верхний (J_{2bd2}). В северо-западной части, вероятнее всего, распространены немагнитные породы мелового возраста (K_1). Пластовые субвулканические тела бодракского комплекса залегают в двух этажах бодракской свиты и имеют северо-восточное простирание (в среднем 60° СВ) и отвечают протяженным линейным магнитным аномалиям, интенсивность которых достигает 1000 нТл. Выделенная система разрывных нарушений имеет преимущественно северо-западное простирание. Горизонтальная мощность субвулканических тел варьирует от первых метров до 60 м. Предположительно, выделенные тела северо-восточного простирания залегают конформно крутопадающей толще бодракской свиты и относятся к первой фазе внедрения (см. раздел 1), а внедрившиеся по разломам дайки, секущие бодракскую свиту, – ко второй.

Для количественной оценки параметров залегания субвулканических тел в разрезе было выполнено 2D магнитное моделирование в программе MagInv2D и GMSYS-2D по серии профилей (AB, CD, EF, GH), секущих субвулканические тела вкрест простирания (рис. 7). Что важно, при параметризации магнитных моделей учитывался полный вектор намагниченности тел – векторная сумма индуцированной и остаточной компонент намагниченности, значения которых были получены в лабораторных петро- и палеомагнитных исследованиях. При построении каждой магнитной модели учитывался рельеф местности и азимут профиля. Вначале автором была построена серия стартовых магнитных моделей на основании схемы геологического строения (рис. 7, з), при учете только индуцированной намагниченности тел в пределах от 0.1 до 1.0 А/м. Полученные разрезы по четырем профилям при такой параметризации магнитных моделей оказались недо-стоверными с геологической точки зрения. Автор, используя полученные данные по палеомагнитным исследованиям, провел повторное моделирование по четырем профилям с учетом индуцированной и остаточной намагниченностей. На рис. 7, з обозначены контуры семи субвулканических тел, по которым были получены количественные характеристики.

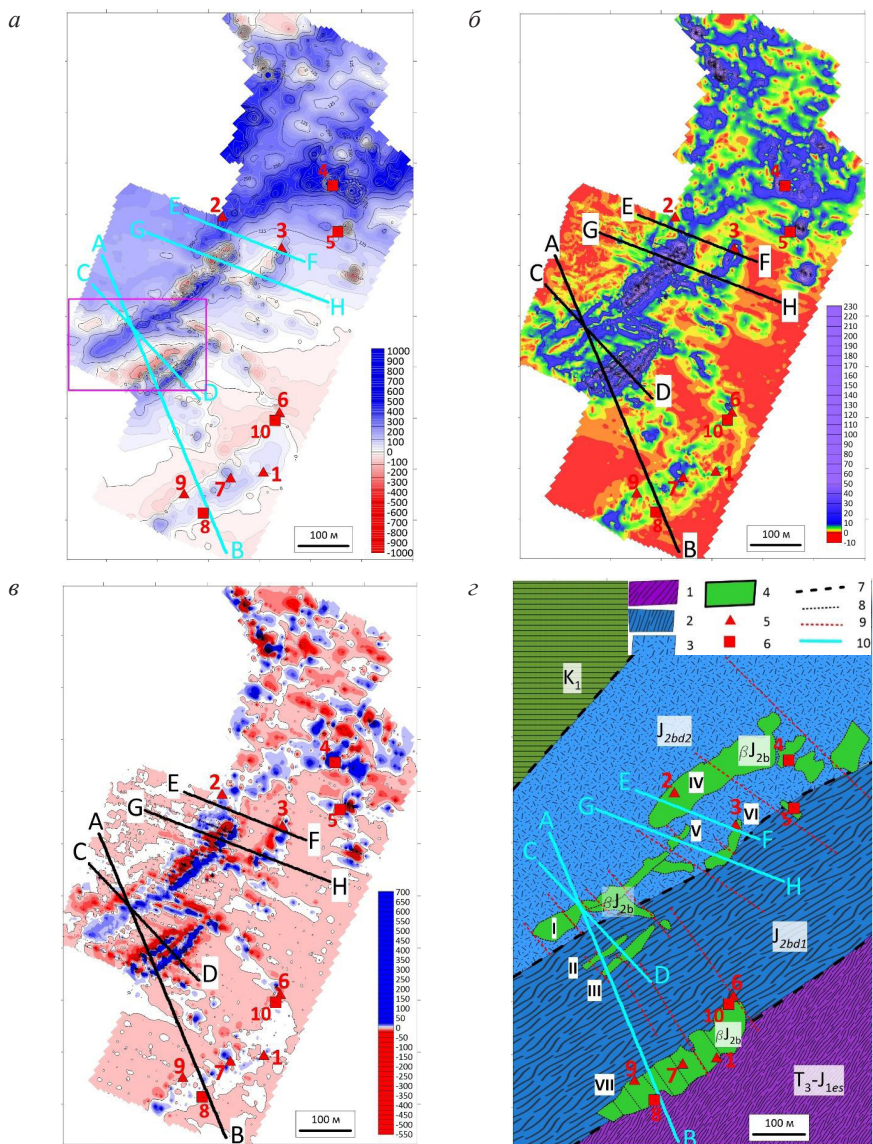


Рис. 7: а) карта магнитного поля ΔT на детальном участке (контур – фрагмент для примера на рис. б); б) полный горизонтальный градиент поля (нТл/м); в) вертикальная производная поля (нТл/м); г) результирующая схема геологического строения бодракского комплекса. Условные обозначения: 1) эскиординская свита (J_{1es}); 2) нижний этаж бодракской свиты (J_{2bd1}); 3) верхний этаж бодракской свиты (J_{2bd2}); 4) субвулканические тела (βJ_{2b}); места отбора образцов палеомагнитной коллекции: 5) без петрографии; 6) с петрографией; 7) предполагаемые геологические границы; 8) границы отдельных блоков субвулканических тел; 9) разломы; 10) линии профилей моделирования. Римскими цифрами обозначены номера субвулканических тел

По результатам геологической интерпретации магнитных моделей по четырем профилям выделяется семь субвулканических тел, круто падающих на северо-запад (углы залегания от 51 до 69°). Горизонтальная мощность тела I в моделях АВ и CD составляет 21 м, глубина его верхней кромки – 8 м. Тела II и III имеют приповерхностное залегание, их горизонтальная мощность в модели АВ составляет 10 и 13 м, в модели CD – 9 и 15 м соответственно. Тело IV на профиле GH залегает на глубине 7 м, его горизонтальная мощность – 14 м, в модели EF тело IV выходит на поверхность, а его мощность увеличивается до 44 м. Тело V мощностью 23 м проявляется в модели EF, имеет приповерхностное залегание и по анализу трансформаций магнитного поля представляется как бескорневое. Также бескорневым является тело VI, проявляющееся на профилях EF, GH. Мощность тела варьирует в пределах 23–25 м, тело выходит на поверхность. Тело VII («силл Короновского») имеет приповерхностное залегание и горизонтальную мощность около 40 м.

Полученные в большом объеме данные по форме, глубине залегания и горизонтальным мощностям изученных тел позволили провести геологическую интерпретацию построенных магнитных моделей. В качестве примера на рис. 8 представлена магнитная модель по профилю АВ со значениями магнитной восприимчивости (k), вектора остаточной намагниченности (J_n , I_n , D_n) и суммарного вектора намагниченности. На геологическом разрезе тела под номерами I, II, III, VII отвечают субвулканическим телам бодракского комплекса. Для тела I вмещающими породами являются отложения верхнего этажа бодракской свиты (J_{2bd2}), тела II и III залегают в породах нижнего этажа бодракской свиты (J_{2bd1}), тело VII («силл Короновского») залегает на контакте пород бодракской и эскиординской свит.

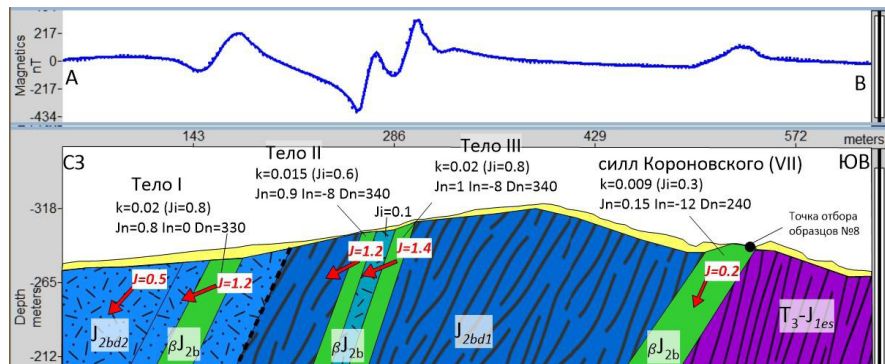
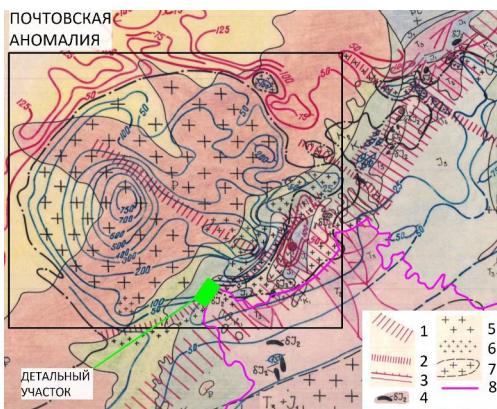


Рис. 8. Результат 2D магнитного моделирования по профилю АВ с учетом индуцированной (J_i) и остаточной намагниченности (J_n). Условные обозначения геологических комплексов см. на рис. 7; I_n – наклонение вектора ЕОН; D_n – склонение вектора ЕОН. Красными стрелками показаны направления суммарного вектора намагниченности и обозначен его модуль

Проведенная интерпретация на основе морфологического анализа аномального магнитного поля и рассчитанных трансформант на детальном участке впервые позволила автору построить схему геологического строения областей развития пород бодракской свиты с элементами разломной тектоники. По результатам количественной интерпретации и выполненного магнитного моделирования построена серия геологических разрезов бодракской свиты, включающей субвулканические тела, с определением горизонтальных и вертикальных мощностей этих образований и их структурного положения в разрезе.

Раздел 5. Геологические результаты изучения региональной Почтовской магнитной аномалии³

Результаты качественной и количественной интерпретации материалов магнитной съемки по детальному участку и новые данные по структурному положению бодракского субвулканического комплекса позволили автору рассмотреть региональные магнитные материалы с целью установления возможного местоположения магматического источника субвулканических тел. На рис. 9 представлен фрагмент геологической карты масштаба 1:200 000 с нанесенными изодинамами вертикальной компоненты магнитного поля ΔZ_a . На карте отчетливо видно, что детальный участок располагается с одной стороны в периферийной части изометричной магнитной аномалии, называемой Почтовской, а с другой стороны он находится в зоне Предгорного разлома – области сочленения Скифской плиты и Горного Крыма.



Условные обозначения: 1 – шовная зона сочленения Скифской плиты и Горного Крыма (Предгорный разлом); 2 – зоны локальных разломов по данным магниторазведки; 3 – нарушения по данным электроразведки; 4 – выходы интрузивных тел; районы распространения магматических тел по данным магниторазведки; 5 – на больших глубинах; 6 – на малых глубинах; 7 – интрузивы по данным электроразведки; 8 – контур Качинского антиклинория

Рис. 9. Геологическая карта с наложенными элементами разломной тектоники и изодинамами магнитного поля [Котляр, 1975]. На карте отмечены контуры Почтовской аномалии и детального участка исследований

Автор поставил перед собой задачу получить по данным магнитной съемки масштаба 1:50 000 (рис. 10, а) в пределах Почтовской магнитной аномалии прогнозные геологические результаты интерпретации по локализации областей развития магматических пород. Используя методику линеamentного анализа морфологии аномальных магнитных полей и их трансформант (описанную в разделе 4), рассчитанных в программе Geosoft Oasis montaj (рис. 10, б, в), были ооконтурены магматические образования с различными магнитными свойствами и намечены элементы разломной тектоники (рис. 10, з).

В пределах Почтовской аномалии наблюдается несколько изометричных высокоинтенсивных магнитных аномалий (до 800 нТл), диаметры которых варьируют от 1 до 6 км. Полученный в ходе проведенных исследований вариант геологической

³ При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

1. Анализ ретроспективных геолого-геофизических материалов при изучении магматических пород бодракского субвулканического комплекса Крыма / Филиппович А.В., Золотая Л.А. // Геофизика. – 2021. – № 6. – С. 125–133. RSCI (0.88 п.л., авторский вклад – 90%). Импакт-фактор РИНЦ, 2019: 0.377.

схемы Почтовской аномалии, диаметр которой оценивается в 16 км, представляет большой интерес для геологов, изучающих эволюцию среднеюрского магматизма и мезозойскую геодинамику региона.

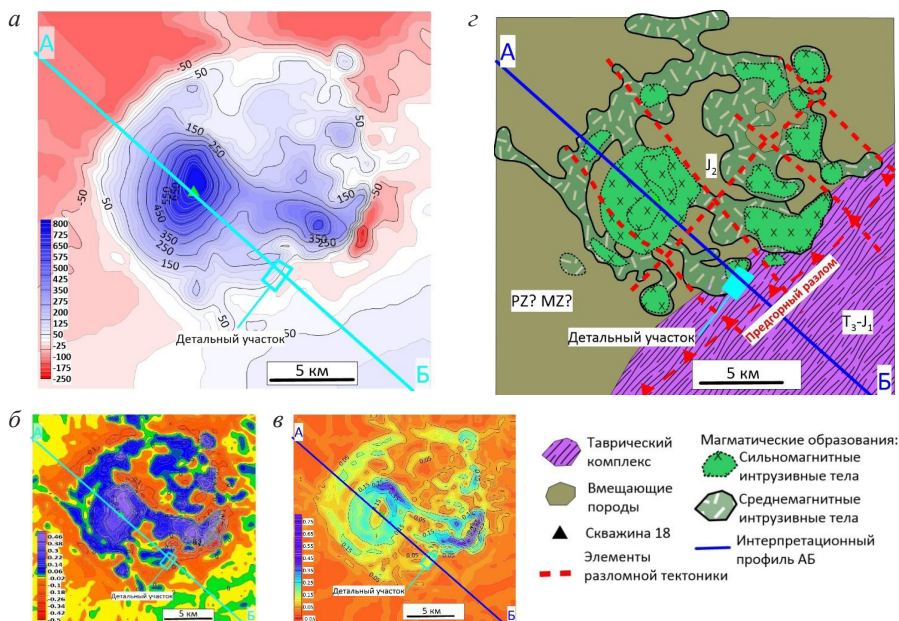


Рис. 10: а) карта ΔZ компоненты аномального магнитного поля масштаба 1:50 000; б) вертикальная производная магнитного поля; в) полный горизонтальный градиент магнитного поля; г) схема геологического строения Почтовской аномалии с элементами разломной тектоники

Для решения обратной задачи и построения магнитной модели Почтовской аномалии автором были привлечены фондовые материалы. Петрофизические характеристики керн из скважины, пробуренной в главный магнитный максимум аномалии, сыграли важную роль при проведении двухмерного и трехмерного магнитного моделирования. По скважинным данным, верхняя кромка главного интрузивного тела располагается на глубине 816 м. Как видно из таблицы (рис. 11, а), до глубины 973 м интрузивное тело характеризуется резко различными значениями магнитных свойств (k и J_n). Сложный состав интрузивного тела свидетельствует о многоэтапном и длительном его формировании.

Петрофизические характеристики приповерхностного бодракского субвулканического комплекса, изученного на детальном участке (раздел 3), отличаются от скважинных данных, что может быть связано с различиями в составе и глубине формирования этих образований. Несмотря на это, можно высказать предположение, что породы интрузии Почтовской аномалии являются материнскими породами для субвулканических тел в левом борту р. Бодрак у с. Трудолубовка.

Для понимания всей сложности магматической структуры Почтовской аномалии в целом автором было выполнено трехмерное магнитное моделирование методом 3D магнитной инверсии поля в программе MagInv3D (Л.С. Чепиги). При расчетах задавалась сеточная модель с размером ячеек 100:100:100 м. В качестве ограниче-

ний инверсии задавались данные петрофизической колонки по скважине, которые предусматривали вариации намагненности ячеек сетки от 0 до 4.3 А/м (рис. 11). На рис. 12 представлена поверхность намагненности со значением 0.5 А/м (извлеченная из резульативной модели), отражающая глубинное строение интрузивных тел в пределах Почтовской аномалии.

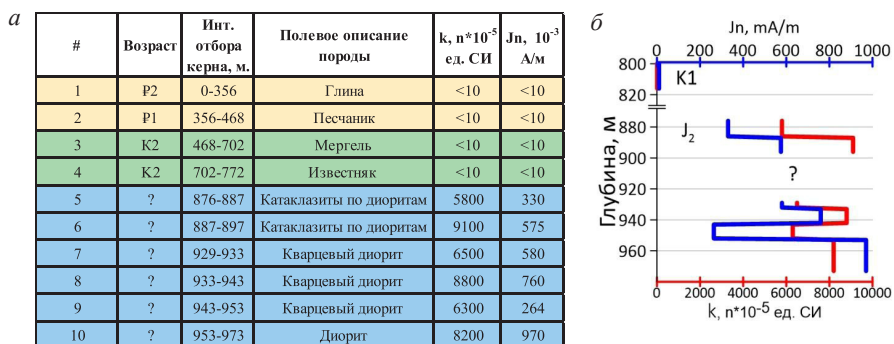


Рис 11: а) Результаты петрофизических измерений магнитной восприимчивости (k) и модуля вектора остаточной намагненности (J_n) по скважине № 18 в с. Почтовое, дополнительно был рассчитан модуль вектора индуцированной намагненности (J_i); б) диаграммы J_n и k по скважине

Изометричность Почтовской аномалии и ее отдельных интрузивных тел позволяет сделать предположение, что ее магматическая структура не подверглась дислокации во время мезозойской складчатости, в отличие от пород бодраской свиты на детальном участке. На основании априорных данных, схемы геологического строения (рис. 10) и трехмерной магнитной модели (рис. 12) автор считает, что интрузивная структура Почтовской аномалии располагается в пределах Скифской плиты.

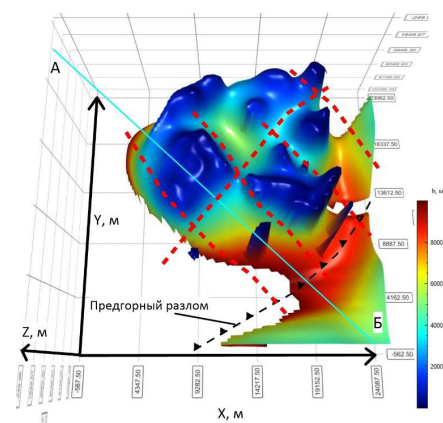


Рис. 12. Магнитная поверхность ($J = 0.5$ А/м) из сеточной 3D-модели, полученной по результатам 3D магнитной инверсии Почтовской аномалии в программе MagInv3D, с нанесенными основными элементами разломной тектоники

Геологические результаты на детальном участке показывают, что отдельные проявления интрузивных структур прослеживаются в периферийной части Качинского антиклинория, сопряженного с зоной Предгорного разлома Крыма (рис. 9, 10).

Для детализации количественных характеристик изучаемого интрузивного тела Почтовской аномалии автором были построены 2D полигональные магнитные модели в программе MagInv2D (Л.С. Чепиго). Геологическая интерпретация магнитной модели вдоль профиля протяженностью 25 000 м через детальный участок, скважину (№ 18) и главный магнитный максимум (800 нТл) показана на рис. 13. По результатам моделирования изучена сложная структура

Почтовской аномалии. Центральная интрузия в районе пикетов 10 000–16 000 характеризуется горизонтальной мощностью 6 км и глубиной залегания около 800 м. Интрузивная толща перекрывается полого падающими на северо-запад мел-палеогеновыми отложениями. В районе пикетов 7500–9000 и 17 000–20 000 прогнозируется наличие серии отдельных маломощных интрузивных тел, средняя горизонтальная мощность которых варьирует в широких пределах. Анализ графиков вертикальной производной и полного горизонтального градиента (рис. 13) показывает, что области локализации прогнозируемых периферийных интрузивных тел выражены локальными экстремумами трансформаций магнитного поля. Это может служить косвенным признаком взаимосвязи формирования основного интрузивного тела Почтовской аномалии и магматических проявлений субвулканического комплекса, часть которых изучена автором на детальном участке (рис. 13).

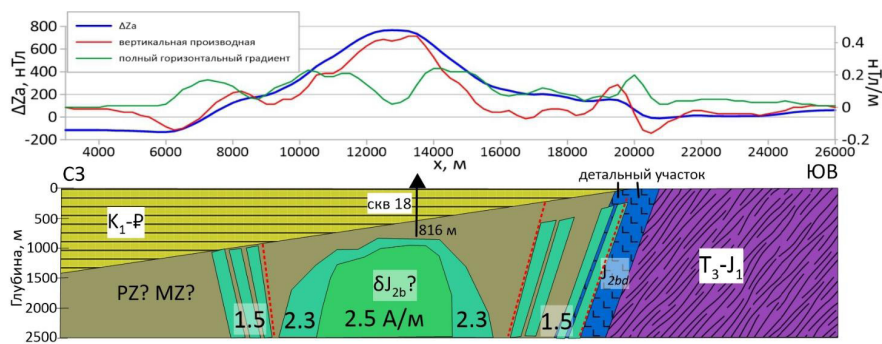


Рис. 13. Графики аномального магнитного поля ΔZ и его производных по профилю АБ Почтовской аномалии и результаты магнитного моделирования с вариантом геологической интерпретации. Числами подписаны значения намагниченности тел (в А/м) в данной модели

Полученные результаты изучения Почтовской аномалии не противоречат представлениям о формировании интрузивного комплекса средней юры в рамках вулканической дуги Понтид-Крыма. В Крыму, по мнению профессора А.М. Никишина (2006), для структур центрального вулкана характерно проявление отдельных ответвлений магматических образований, формирующихся на различных глубинах.

Закключение

Подробное изучение литературных и фондовых материалов по геологии бодракской свиты среднеюрского возраста в Крыму выявило значительное количество дискуссионных вопросов о ее формировании. При решении этих вопросов в ретроспективных материалах редко использовались результаты интерпретации методов магниторазведки, гравиразведки, сейсморазведки и электроразведки.

В диссертации защищается успешный результат интерпретации площадных магнитных исследований, выполненных автором в районе с. Трудолюбовка Бахчисарайского района Крыма, при изучении геологических разрезов в области развития пород бодракской свиты средней юры. Примененные автором методы интерпретации магнитных данных позволили сделать выводы, что ярко выраженные, линейные, разной интенсивности аномалии на детальном участке исследований приурочены к субвулканическим телам бодракского комплекса северо-восточного простирания, что позволило построить схему геологического строения изученного участка с обозначением протяженности субвулканических тел и их горизонтальных мощностей.

Магнитные исследования были проведены автором в комплексе с детальными палеомагнитными исследованиями. Автором из 10 обнажений субвулканических тел на территории исследований было отобрано 140 ориентированных в пространстве образцов для дальнейших палеомагнитных и петромагнитных лабораторных исследований. Результаты экспериментальных палеомагнитных исследований, состоящие из определения компонентного состава естественной остаточной намагниченности с помощью магнитных чисток, измерения магнитной восприимчивости образцов и ее анизотропии, определения параметров петель гистерезиса, доменного состояния магнитных минералов, электронной микроскопии магнитных минералов и петрографического описания шлифов позволили сделать важный вывод: породы бодракского субвулканического комплекса средней юры разделяются на две группы, принципиально отличающиеся между собой значениями и направлениями векторов суммарной и характеристической компонент естественной остаточной намагниченности.

Автор диссертации анализирует результаты двухмерного магнитного моделирования разрезов бодракской свиты вдоль серии профилей, секущих оси положительных магнитных аномалий, выявленных на исследуемом участке. Они позволяют автору оценить глубины залегания субвулканических тел, их формы и горизонтальные мощности. При проведении магнитного моделирования им были учтены значения индуцированной и остаточной намагниченностей, полученные в ходе лабораторных петро- и палеомагнитных исследований отобранной им представительной коллекции образцов.

Важным результатом диссертационной работы является построение первой прогнозной трехмерной магнитной модели изученной им Почтовской аномалии, которая характеризует сложнопостроенную интрузию, формирующую эту аномалию. По результатам двухмерного магнитного моделирования автором получены количественные оценки параметров глубины и горизонтальной мощности этой интрузии. Исследовательская работа по изучению региональных материалов Почтовской аномалии по магнитным съемкам масштаба 1:50 000 позволила спрогнозировать схему геологического строения сложнопостроенных интрузивных образований средней юры. Автором высказано предположение, что площадь развития пород бодракской свиты, изученная им в районе с. Трудолюбовка Бахчисарайского района, относящаяся к периферийному участку Качинского антиклинория, может быть связана с формированием магматических тел на площади Почтовской аномалии.

Полученные данные научно-исследовательской диссертационной работы вносят большой вклад в научный фонд Крымского учебно-научного центра имени профессора А.А. Богданова и в Крымский ТФГИ.

Научные проблемы в пределах изученных площадей развития пород бодракской свиты могут представлять большой интерес при будущих комплексных геолого-геофизических исследованиях различных кафедр геологического факультета МГУ. В частности, представляется перспективным детальное изучение уникальной геологической структуры «силла Короновского», для которой автор рекомендует проведение детальной прецизионной магнитной съемки в комплексе с полевыми палеомагнитными и геохимическими исследованиями. Решение этой задачи обеспечит научным материалом не одно поколение магистрантов и аспирантов геологического факультета МГУ.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Научные статьи, опубликованные в журналах Scopus, WoS, RSCI,
а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете
МГУ по специальности 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков
полезных ископаемых**

1. Комплексирование данных площадных магнитных и палеомагнитных исследований в Крыму для уточнения геологического строения интрузий бодракской свиты средней юры / Золотая Л.А., Коснырева М.В., Паленов А.Ю., **Филиппович А.В.** // Геофизика. – 2020. – № 1. – С. 73–81. RSCI. DOI: 10.34926/geo.2020.2.2020.001. (0,56 п.л., авторский вклад – 75%). Импакт-фактор РИНЦ, 2019: 0.377.
2. Комплексный анализ аномальных магнитных полей и палеомагнитных данных в юго-западной части Качинского антиклинория Крыма / **Филиппович А.В.**, Золотая Л.А., Веселовский Р.В., Федюкин И.В. // Геофизика. – 2021. – № 4. – С. 57–70. RSCI. DOI: 10.34926/geo.2021.80.23.001. (0,88 п.л., авторский вклад – 80%). Импакт-фактор РИНЦ, 2019: 0.377.
3. Анализ ретроспективных геолого-геофизических материалов при изучении магматических пород бодракского субвулканического комплекса Крыма / **Филиппович А.В.**, Золотая Л.А. // Геофизика. – 2021. – № 6. – С. 125–133. RSCI. DOI: 10.34926/geo.2021.6.2021.001. (0,5 п.л., авторский вклад – 80%). Импакт-фактор РИНЦ, 2019: 0.377.

Иные научные публикации

4. Study of Magmatic Formation Structure Using High-Precision Magnetic Survey / Золотая Л.А., Коснырева М.В., Паленов А.Ю., **Филиппович А.В.** // Сборник EAGE EarthDoc, серия Engineering and Mining Geophysics. – 2019. – С. 1–9.
5. Магнитное моделирование геологических разрезов Бахчисарайского района Крыма на основе новых палеомагнитных данных / **Филиппович А.В.**, Федюкин И.В., Золотая Л.А., Коснырева М.В. // Сборник трудов IV Международной геолого-геофизической конференции и выставки «ГеоЕвразия-2021. Геологоразведка в современных реалиях». – 2021. – С. 112–118.
6. Анализ результатов лабораторных методов определения магнитных свойств магматических пород бодракской свиты / **Филиппович А.В.**, Золотая Л.А., Федюкин И.В. // Сборник «Ломоносовские чтения». Секция «Геология». – 2021. – С. 9–11.