

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Шестаков Петр Александрович

**Строение и механизмы формирования интрузивных комплексов
Южного Урала по комплексным данным**

Специальность 1.6.1. Общая и региональная геология. Геотектоника и
геодинамика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2026

Диссертация подготовлена на кафедре региональной геологии и истории Земли геологического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Научные руководители:

Тевелев Александр Вениаминович

*доктор геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник*

Модин Игорь Николаевич

доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Бычков Андрей Юрьевич – доктор геолого-минералогических наук, профессор РАН, доцент, Московский государственный университет

имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, заведующий кафедрой геохимии

Петров Георг Аскольдович – доктор геолого-минералогических наук, доцент, Уральский государственный горный университет, факультет геологии и геофизики, кафедра геологии, минералогии и петрографии, профессор

Межеловская Софья Владимировна – кандидат геолого-минералогических наук, Геологический институт Российской академии наук, старший научный сотрудник

Защита диссертации состоится 23 октября 2026 г. в 17 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.016.7 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, геологический факультет, ауд. 415.

E-mail: nvbadulina@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций Научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/4044>

Автореферат разослан «__» сентября 2026 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета МГУ.016.7,

кандидат геолого-минералогических наук

Ю.А. Гатовский

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одна из фундаментальных задач геологии - исследование процессов формирования и эволюции горных систем. Изучение закономерностей возникновения и трансформации горных массивов важно для решения многих прикладных задач региональных геолого-съемочных работ и обоснования прогнозно-ресурсного потенциала территорий.

Информация о геодинамических обстановках, строении и эволюции горных образований Южного Урала базируется на петрологическом и геохимическом анализе, изотопном определении возраста пород. Несмотря на высокую изученность процессов магматизма и тектоники Магнитогорской и Восточно-Уральской мегазон, в настоящее время остается много нерешенных проблем. Это делает актуальной задачу исследования истории возникновения и эволюции гранитоидных интрузивных комплексов с помощью методов петромагнитного и палеомагнитного анализа, которые ранее практически не применялись при изучении массивов Магнитогорской мегазоны. Исключение составляет работа (Коптев и др., 2023), посвященная механизму формирования Неплюевского плутона Восточно-Уральской мегазоны.

Степень разработанности проблемы. Исследования магматизма гранитоидных массивов на Южном Урале проводились многими исследователями в научных и практических целях с 1930-х годов, но только с 1950-60-х годов в публикациях дается относительно полноценная оценка их геологического строения, состава и возраста. В силу развития современных методов исследований и наращивания базы данных для проведения сравнительного анализа в последние десятилетия появились принципиально новые данные о магматизме Южного Урала и соответствующие обобщающие работы (Червяковский, 1981; Пучков, 2000, 2010; Тевелев и др., 2009; Фурина и др., 2010;; Ферштатер, 2013; Салихов и др., 2019).

Работы по созданию и обновлению Государственных геологических карт масштаба 1:200 000 на Южном Урале дают наиболее свежее представление об объектах исследования (Лисов и др., 2018; Тевелев и др., 2018). Состав и геохимические характеристики гранитоидных плутонов подробно изучены и перепроверены многими исследованиями. Однако, возраст и последовательность внедрения многих интрузивных комплексов до конца не установлены. Так по возрасту Чекинского массива есть две точки зрения – формирование массива в каменноугольном периоде (Салихов и др., 2013) и в триасовом (Тевелев и др., 2009). Интрузивные комплексы, слагающие Чилектинский плутон, не имеют детально верифицированного возраста: средне-позднедевонский краснинский и раннекаменноугольный куйбасовский комплексы отнесены к соответствующим периодам по геохимическим и геологическим данным, недостаточно верифицируемых датировками (Лисов и др., 2018). Для Чекинского массива была предложена модель сдвигового магматического дуплекса (Тевелев, Тевелев, 1999), основанная на общегеологических данных (Тевелев, Фурина, 2010).

Объекты и предмет исследования. Чекинский и Чилектинский плутоны в пределах Магнитогорской мегазоны, сложены сильномагнитными породами с близким составом и содержанием магнитных минералов. Для сравнения изучены аналогичные характеристики слабомагнитных пород Крыклинского плутона Восточно-Уральской мегазоны. Исследования Крыклинского плутона проводились в пределах распространения пород третьей фазы неплюевского комплекса. На основе комплексного сравнительного исследования структурных, геохимических, возрастных, геофизических, петро- и палеомагнитных характеристик трех гранитоидных плутонов рассмотрены возможные модели формирования плутонов в контексте становления горных систем Южного Урала с девонского по триасовый периоды.

Цель и задачи. Целью настоящей работы является выявление закономерностей в механизмах формирования разновозрастных (от девонских до триасовых) интрузивов Южного Урала на базе сравнительного анализа

магнитных, геохимических, структурных характеристик и возраста гранитоидных массивов.

Для достижения этой цели следовало решить следующие задачи:

1. Сравнить петрологические и геохимические характеристики трех плутонов для определения особенностей их состава и геодинамических обстановок формирования.
2. Определить (и уточнить) возраст трех плутонов с помощью уран-свинцового изотопного датирования по циркону.
3. Исследовать методами магнитной минералогии породы плутонов и определить характер анизотропии магнитной восприимчивости, отражающей направление течения магмы и морфологию магматических тел, для реконструкции процессов становления плутонов.
4. Установить палеоположение плутонов при их формировании и описать их дальнейшие передвижения.
5. Построить модели формирования исследуемых плутонов в рамках геодинамических процессов на Южном Урале.

Научная новизна. Впервые определена верхняя граница возраста Чилектинского плутона в 380 млн лет, что позволило выделить новый плутонический позднедевонский комплекс (ранее считавшийся каменноугольным куйбасовским), входящий вместе с краснинским комплексом в состав полихронного Чилектинского плутона.

Впервые проведены палео- и петромагнитные сравнительные исследования Чекинского, Чилектинского и Крыклинского плутонов. По результатам изучения анизотропии магнитной восприимчивости обнаружены значительные различия в механизмах формирования этих плутонов. В Чекинском массиве ориентировка течения расплава определялась, в первую очередь, тектоническим фактором, вследствие которого массив сформировался по модели сдвигового магматического дуплекса. В случае Чилектинского полихронного плутона краснинский комплекс сформировался в схожих с Чекинским массивом

условиях сдвигового магматического дуплекса, а куйбасовский - в виде группы штокообразных тел.

На основе палеомагнитного анализа установлено вращение блоков Чилектинского и Крыклинского плутонов при их формировании. Параметры вращения Чилектинского плутона сходятся с параметрами вращения Крыклинского плутона, что свидетельствует о возможной сопряженности движений Магнитогорской и Восточно-Уральской мегазон в конце девонского и начале каменноугольного периодов. В пределах Чекинского массива выявлено полное перемагничивание пород.

Теоретическая значимость работы. Результаты исследования вносят вклад в: понимание закономерностей и механизмов формирования гранитоидных плутонов на Южном Урале. Детализация характеристик конкретных плутонов региона существенно дополняет сведения по региональному геологическому строению и датировкам тектонических событий на Южном Урале.

Практическая значимость работы. Работа обосновывает применение комплекса магнитных исследований, демонстрирующих высокую эффективность и перспективность использования геофизических методов петро- и палеомагнитного анализа и магниторазведки для реконструкции процессов формирования плутонов, их типизации, понимания истории возникновения и эволюции складчатых систем на Южном Урале. Также на основании результатов исследования можно дополнить легенды геологических карт региона, которые необходимы для региональных исследований.

Фактический материал и методики исследований. Фактический материал, положенный в основу диссертационной работы, был собран автором в течение трех полевых сезонов (2021–2023 годы) на Южном Урале:

Первый полевой сезон (в рамках коллективных работ по гранту РФФИ, проект № 19-55-26009 Чехия_а) - отобрано 10 проб на геохимию и U-Pb датирование по циркону, отбурено 62 образца для петро- и палеомагнитных исследований и сделано более 180 замеров трещиноватости и линейностей на 7 точках исследований Чекинского массива.

Второй полевой сезон (в рамках коллективных работ по гранту РФФИ) - изучены Крыклинский и Чилектинский плутоны, где суммарно было отобрано 15 проб на геохимию и U-Pb датировки по циркону и 205 образцов для петро- и палеомагнитных исследований.

Третий полевой сезон (организован и проведен автором с привлечением двух студентов геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова) включал следующие задачи: отбор 5 новых образцов и 5 повторных для геохимического анализа РЗЭ и отбор бурением 54 новых петро- и палеомагнитных образцов на Крыклинском и Чилектинском плутонах; на Чекинском и Чилектинском плутонах проведена пешая магниторазведка по 6 субширотным профилям (по 3 на объект) общей протяженностью более 20 км.

Методы исследований включали: геохимические исследования – петрографический анализ шлифов, силикатный химический анализ, ICP-MS анализ; изотопные датировки – U-Pb по циркону; анализ трещиноватости для Чекинского массива – путем замера трещин, аэрофотосъемки и анализа космоснимков; магнитную минералогию – дифференциальный термомагнитный анализ (DTMA) и анализ коэрцитивных спектров с помощью спектрометра J-meter; палеомагнитные исследования – замеры величины и направления естественной остаточной намагниченности (ЕОН) на спин-магнетометре JR-6 вместе со ступенчатым терморазмагничиванием; петромагнитные исследования – изучение анизотропии магнитной восприимчивости (AMS) с помощью каппа-моста MFK-1FA; магниторазведку – с применением двух магнитометров МИНИМАГ-М.

Личный вклад. Автор участвовал во всех полевых этапах и совместно с коллегами выполнял полный комплекс работ по отбору образцов, замерам трещиноватости и проведению магниторазведки. Эти материалы легли в основу всех публикаций автора (статьи [1-5]). Третий полевой сезон организован автором самостоятельно. В рамках лабораторных исследований (лаборатория палеомагнетизма ГИН РАН) непосредственно автором проведены подготовка образцов, четыре цикла терморазмагничивания и сопутствующие замеры NRM и

AMS, на основании которых написаны работы [1, 2, 5]. Автор провел измерения магнитной минералогии для образцов Крыклинского и Чилектинского плутонов представленные в статье [1] в Лаборатории палеоклиматологии, палеоэкологии и палеомагнетизма Казанского Федерального Университета. Автором описаны шлифы для петрографической характеристики пород, которая рассматривается в статье [3]. Геохимические лабораторные исследования и комплекс лабораторных работ по определению возраста пород проведены без прямого участия автора.

Все подсчеты, построение графиков и интерпретация результатов, проведена соискателем под руководством научных руководителей. В подготовку научных публикаций по теме диссертации автор внес значительный вклад на всех этапах работ.

Защищаемые положения

1. Кинематическая модель формирования Чекинского триасового массива соответствует модели сдвигового магматического дуплекса, сформировавшегося в условиях правосторонней транстенсии на попутном изгибе Карабулакского взбросо-сдвига.
2. Полихронный Чилектинский плутон, включающий средне-позднедевонский краснинский и позднедевонский (380 млн лет) чилектинский комплексы, формировался в качестве сдвигового магматического дуплекса в условиях левосторонней транстенсии на попутном изгибе одноименного сдвига.
3. Палеомагнитные данные свидетельствуют о наличии внутриблоковых перемещений и/или вращений Чилектинского и Крыклинского плутонов.

Достоверность и обоснованность полученных результатов.

Достоверность полученных данных обеспечивалась большим объемом фактического материала, применением современных методов с использованием высокоточного оборудования. Соблюдены все общепринятые статистические методы обработки данных. Результаты исследований по отдельным методам сопоставлены между собой для дополнительного подтверждения достоверности.

Публикации и апробация работы. Результаты исследований доложены автором на четырех тематических международных и российских научных конференциях: «LIII (53) Тектоническое совещание» (Москва, 2022), «EGU – 2023» (Вена, Австрия, 2023), «Ломоносов – 2024» (Москва, 2024), «LVI (56) Тектоническое совещание» (Москва, 2025).

Основные положения, результаты и выводы диссертации отражены в 5 научных трудах, все 5 опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа объемом 206 страниц содержит 55 иллюстраций, 21 таблицу и 22 приложения. Список литературы включает 143 источника.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Геолого-геофизическая характеристика района исследований

Южный Урал представляет собой сегмент Уральской складчатой системы, сформировавшейся в палеозое в результате закрытия Палеоуральского океана и коллизии Восточно-Европейской платформы (ВЕП) с островными дугами и микроконтинентами. В пределах восточного склона Южного Урала (к востоку от Главного Уральского разлома) с запада на восток выделяются следующие мегазоны: Главный Уральский разлом, Магнитогорская мегазона, Восточно-Уральская мегазона и Зауральская мегазона (Пучков, 2000, 2010). Гранитоидные плутоны наиболее распространены в Магнитогорской и Восточно-Уральской мегазонах (Ферштатер, 2013). Гранитоидные плутоны, выбранные в качестве объектов исследования, расположены в Магнитогорской (ММЗ) и Восточно-Уральской (ВУМЗ) мегазонах восточного склона Южного Урала (Ферштатер, 2013). Их расположение представлено на рисунке 1.

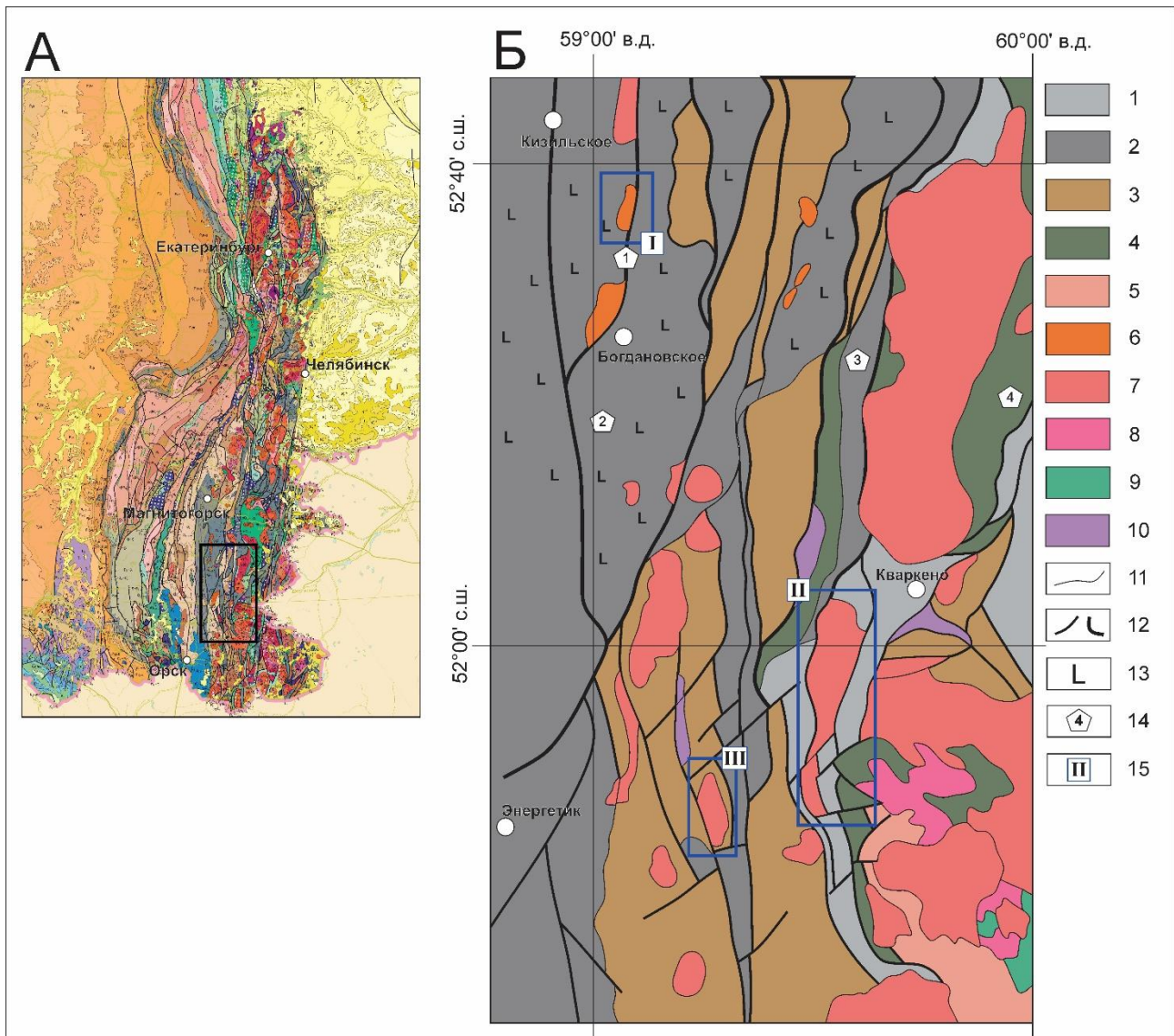


Рисунок 1 – А – фрагмент геологической карты России масштаба 1:2 500 000. Б - геологическая карта района исследований по (Лисов и др., 2018; Тевелев и др., 2018): 1 – каменноугольные терригенные породы; 2 - каменноугольные вулканические породы; 3 – девонские породы; 4 – ордовикские породы; 5 – рифейские породы; 6 – щелочные гранитоиды; 7 – гранитоиды; 8 – гнейсодиориты; 9 – метагаббро; 10 – мафические породы; 11 – границы геологических подразделений; 12 – разрывные нарушения; 13 – базальтоиды; 14 – структурные объекты: 1 – Карабулакский взбросо-сдвиг, 2 – Магнитогорская мегазона, 3 – Уйско-Новооренбургская сутурная зона, 4 – Восточно-Уральская мегазона; 15 – объекты исследования: I – Чекинский массив, II – Крыклинский плутон, III – Чилектинский плутон

Чекинский массив (Кизильский район Челябинской области) в пределах Центрально-Магнитогорской подзоны имеет меридиональное простирание (6,5×1-2 км), с востока ограничен Карабулакским взбросо-сдвигом и прорывает

вулканогенно-осадочные породы карбона (греховская и березовская свиты). Сложен тремя фазами малочекинского комплекса: монцодиориты (1-я фаза), щелочные сиениты (2-я), щелочные граниты (3-я). Точный возраст массива не установлен и варьирует от раннекаменноугольного (Салихов и др., 2013) до триасового (Фурина и др., 2010; Тевелев и др., 2009; Старков и др., 1975).

Чилектинский плутон (Оренбургская область, восточнее Ириклинского водохранилища) в пределах Восточно-Магнитогорской подзоны размером 10×25 км, имеет форму линзы (4×14 км). Ранее считалось, что плутон сложен породами двух комплексов: средне-позднедевонского краснинского (гранодиориты, плагиограниты) и раннекаменноугольного куйбасовского (габбродииориты, граносиениты) (Лисов и др., 2018).

Крыклинский плутон (Адамовский район Оренбургской области) на западном краю ВУМЗ имеет форму линзы (20×8 км). Изучена третья фаза неплюевского комплекса (ранний карбон), представленная гнейсоплагиогранитами, гнейсодиоритами, гранитами. Породы сильно разгнейсованы, что указывает на постмагматические деформации. Предполагаемый возраст – 340–350 млн лет (по литературным U-Pb данным (Лисов и др., 2018)).

Глава 2. Материалы и методы исследований

Комплексные полевые работы (2021–2023 гг.) на трёх плутонах включали: отбор 35 проб для геохимического и 11 проб для изотопно-геохронологического анализа, бурение ориентированных кернов для петро- и палеомагнитных исследований (318 образцов), замеры трещиноватости и линейности (более 180 замеров) и аэрофотосъёмку (дрон *Mavic Mini 2*), а также пешую магниторазведку по 6 профилям на Чекинском массиве и Чилектинском плутоне общей протяжённостью 20 км с применением оверхаузеровских магнитометров МИНИМАГ-М.

Лабораторные исследования вещественного состава включали петрографическое описание шлифов (микроскоп Olympus BX53P), силикатный

химический анализ (мокрая химия, атомно-абсорбционный метод) и определение содержания рассеянных элементов методом ICP-MS (Agilent 7700x). Анализы выполнены в Южно-Уральском ФНЦ минералогии и геоэкологии УрО РАН, в ИМ УрО РАН и в геохимической лаборатории геологического факультета МГУ.

Изотопно-геохронологические исследования проведены методом U-Pb по циркону. Для Чекинского массива использован вторично-ионный микрозонд SIMS SHRIMP-II (ЦИИ ВСЕГЕИ, Санкт-Петербург); для Крыклинского и Чилектинского плутонов – LA-ICP-MS (Agilent 7900 с лазерной абляцией Teledyne Analyte Excite) в лабораториях ИЗК СО РАН (Иркутск) и ИФЗ РАН (Москва).

Петромагнитные исследования включали дифференциальный термомагнитный анализ (DTMA) с использованием весов Кюри и коэрцитивную спектрометрию на приборе *J-meter* (КФУ, Казань). Разложение коэрцитивных спектров выполнено в программах *Max Unmix* (для Чекинского массива) и *MATLAB* (для Крыклинского и Чилектинского плутонов). Анизотропия магнитной восприимчивости (AMS) измерялась на каппа-мосте MFK-1FA (AGICO) в лаборатории палеомагнетизма ГИН РАН до и после термической чистки. Обработка данных AMS проведена в пакетах Anisoft 4.2 и 5.1.

Измерения естественной остаточной намагниченности (ЕОН) проводились на спин-магнитометре JR-6 (AGICO, Чехия) при ступенчатом терморазмагничивании (печь TD48). Выделение компонент остаточной намагниченности выполнено в программе *Remasoft 3.0*. Дальнейший анализ ЕОН проводился в программном пакете Р. Энкина (Enkin, 1994). Для работы с виртуальными геомагнитными полюсами (ВГП) применялась программа *GMAP2015* (Torsvik, Smethurst, 1999). Магниторазведка проведена с учётом вариаций геомагнитного поля (модель IGRF2020) и остаточной намагниченности; моделирование выполнено в программе *GravMagInv2D*.

Глава 3. Петрографический и геохимический анализ

Чекинский массив сложен щелочными гранитоидами малочекинского комплекса с признаками вторичных изменений. Породы отнесены к А-типу гранитоидов. Наблюдается распределение редкоземельных элементов (РЗЭ) схожее с верхней континентальной корой (ВКК), обогащение тяжелыми элементами, выраженный европиевый минимум. На мультиэлементных спектрах – глубокие минимумы Cs, Sr, Nb-Ta, максимум Pb. Содержание Cs и Rb ниже, чем в верхней коре, что указывает на примесь мантийного компонента. Наиболее вероятная геодинамическая обстановка формирования – постколлизийный рифтогенез.

Крыклинский плутон представлен мелко- и среднезернистыми гранитами, адамеллитами, кварцевыми диоритами третьей фазы неплюевского комплекса. По результатам количественного химического анализа выделены кварцевые диориты и лейкограниты. Спектры РЗЭ имеют пологие отрицательные тренды, европиевый минимум выражен в большинстве проб. В распределении мультиэлементных спектров наблюдаются Ta-Nb минимум, минимумы Cs, Ba, Sr, глубокие минимумы Zr и Hf в кварцевых диоритах. Поведение Pb неоднородно (максимумы в гранитах, минимумы в диоритах). Геодинамическая обстановка – субдукция с плавлением аккреционного клина (S-тип гранитоидов).

Чилектинский плутон представлен гранодиоритами и плагиогранитами краснинского комплекса и монцодиоритами, габбро, граносиенитами, умереннощелочными гранитами чилектинского комплекса. Распределение РЗЭ однородно: крутой тренд La-Nd, горизонтальный для остальных тетрад, европиевый минимум. Распределение мультиэлементных спектров показывает: глубокий Ta-Nb минимум, отчетливый Pb максимум, минимумы Sr и Eu, Ba максимум. Обстановка формирования – надсубдукционная (I-тип гранитоидов).

Глава 4. Изучение возраста гранитоидных плутонов

Чекинский массив. Рассмотрены данные U-Pb датировок по циркону и проведено сравнение морфологии кристаллов циркона из вмещающих пород каменноугольного периода (Правикова, и др., 2025а) и цирконов Чекинского массива (табл. 1).

Зерна циркона Чекинского массива и вмещающих пород имеют схожие характеристики. Выделены общие группы цирконов по морфологии. Цирконы Чекинского массива в сравнении с цирконами вмещающих пород более деформированы, меньше по размеру, имеют сколы, следы метамиктного распада. Датировки кристаллов циркона из каменноугольных дацитов однозначно показали раннекаменноугольный возраст, а цирконы Чекинского массива имеют значительный разброс от раннекаменноугольной эпохи до юрского периода. Средний возраст цирконов вмещающих пород составляет 346,6 млн. лет, а возраст каменноугольных цирконов Чекинского массива – 346,6 млн. лет.

Таблица 1 – Возрасты Чекинского массива и вмещающих пород

Породы	Точка	Возраст (млн лет)	Период
Массив	701	$349,5 \pm 3,4$	Каменноугольный
Массив	702	$345,4 \pm 3,2$	Каменноугольный
Массив	753	345	Каменноугольный
Массив	754	$290,7 \pm 5,1$	Пермский
Массив	756	$179,9 \pm 2,6$	Юрский
Вмещающие	704	$348,5 \pm 3,1$	Каменноугольный
Вмещающие	706	$350,7 \pm 2,9$	Каменноугольный
Вмещающие	706/3	$340,6 \pm 2,8$	Каменноугольный

Благодаря совокупности факторов вариативности возрастов, схожей морфологии цирконов Чекинского массива и вмещающих пород, а также признаков механической деформации цирконов можно заключить, что данные цирконы являются захваченными и относятся к вмещающим каменноугольным породам. Таким образом, опираясь на литературные триасовые датировки, можно утверждать, что Чекинский массив сформировался в триасе.

Чилектинский плутон. Изучена проба, отобранная из граносиенитов второй фазы интрузивного комплекса, который ранее (по геологическим данным)

был отнесен к раннекаменноугольному куйбасовскому комплексу. Конкордантный возраст составил 380 ± 11 млн лет (2σ), что соответствует позднему девону (франский век).

Полученные результаты датирования не согласуются с литературными данными. Интрузивы раннекаменноугольного куйбасовского комплекса прорывают шумилинскую свиту (Лисов и др., 2018), но отнесение исследованных пород к этому комплексу проблематично: возраст цирконов из наиболее молодых лейкогранитов «куйбасовского» комплекса — 380 млн лет. Из этого следует, что и другие породы Чилектинского плутона имеют позднедевонский возраст или древнее. Породы «куйбасовского» комплекса относятся к субщелочной серии, отличаясь от позднедевонских тоналит-плагиогранитов краснинского комплекса. Среди аналогов «куйбасовского комплекса» по возрасту и составу выделяются урускиенский и верхнеуральский комплексы, к которым можно было бы отнести изученные в данной работе породы.

Решение вопроса о принадлежности наиболее молодых пород Чилектинского плутона к плутоническому комплексу имеет три варианта: 1) выделить новый чилектинский комплекс; 2) отнести породы к урускиенскому комплексу; 3) отнести породы к верхнеуральскому комплексу. Автор считает наиболее обоснованным вариантом выделение нового позднедевонского плутонического чилектинского комплекса с возрастом 380 млн лет.

Глава 5. Петромагнитные исследования и структурный анализ

Петромагнитные исследования Чекинского массива. Величина магнитной восприимчивости (M_S) пород варьирует от 180×10^{-5} до 8800×10^{-5} ед. СИ, причём 60% образцов имеют значения $>1000 \times 10^{-5}$ СИ. Естественная остаточная намагниченность (NRM) изменяется от 100 мА/м до 100 А/м.

Дифференциальный термомагнитный анализ (ДТМА) показал, что основным ферромагнитным минералом является магнетит или высокожелезистый титаномagnetит. На кривых ДТМА наблюдается

необратимый рост намагниченности в интервале 350–430°C, не воспроизводящийся при повторном нагреве, что связано с переходом маггемита в гематит в аэробных условиях. Сохранение намагниченности до 660°C свидетельствует о присутствии гематита. Разложение коэрцитивных спектров выявило три популяции зерен магнетита и гематит на некоторых точках.

Магнитная текстура гранитоидов на большинстве изученных сайтов Чекинского массива практически одинакова и связана преимущественно с магнетитом (рис. 2). Такой тип магнитной текстуры встречается на отдельных участках гранитоидных массивов трансенсивных зон, хотя, в целом, распределение AMS в таких массивах носит более сложный характер (McNulty et al., 2000; Archanjo et al., 2009; Lyra et al., 2018).

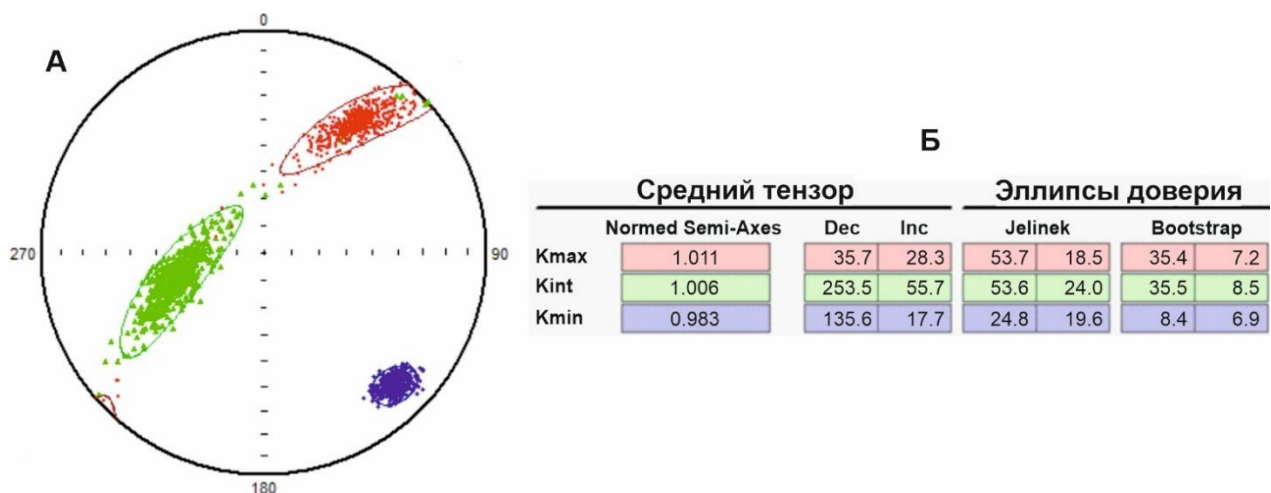


Рисунок 2 – Результаты анализа анизотропии магнитной восприимчивости Чекинского массива: А - Оценка средних направлений главных осей AMS для всех точек на массиве методом bootstrap (Tauche et al., 1991) и соответствующие доверительные интервалы. Б – таблица статистических данных для трех осей

Отличное схождение данных по магнитной текстуре хорошо объясняет результаты физического моделирования формирования массивов в зонах трансенсии, верифицированного на реальном геологическом объекте (Dietl et al., 2006). На начальном этапе кинематика модели полностью соответствует модели Риделя, при которой внедрение магмы происходит вдоль трещин отрыва с формированием плутонов каплеобразной формы, ориентированных вдоль трещин, которые в дальнейшем объединяются в структуру, субпараллельную

генеральному сдвигу (см. рис. 2с и 2е в (Dietl et al., 2006)). Дальнейшее смещение по сдвигу приводит к деформации плутона и последовательному формированию S-образной структуры. Магнитная текстура Чекинского массива соответствует начальному этапу рассмотренной модели. Подъем гранитной магмы происходил по субвертикальным каналам вдоль трещин отрыва. Залегание плоскости подводящего канала и, соответственно, трещин отрыва имеет ориентировку 48° (плоскости осей $K_{\max}$ - $K_{\min}$). Угол падения этой плоскости составляет 72° ($= 90^\circ$ – наклонение оси $K_{\min}$).

Анализ трещиноватости. С целью реконструкции деформационного режима, действовавшего при формировании Чекинского массива, проведён анализ трещиноватости. На исследованных точках чётко определяются три взаимно перпендикулярные группы трещин – прототектонические трещины, образовавшиеся при остывании магматического тела. Эти группы имеют следующие элементы залегания: группа Q – азимут простирания 289° угол падения 65° ; группа S – $38^\circ \angle 57^\circ$; группа L – $148^\circ \angle 19^\circ$ (рис. 3А). Наиболее развиты трещины группы Q, по которым впоследствии внедрялись дайки аплитов.

Остальные трещины, не вошедшие в эти три группы, интерпретированы как тектонические, связанные с активностью регионального Карабулакского взбросо-сдвига субмеридионального простирания. Выделены основные сколы по системе Риделя (рис. 3Б). Генеральный разлом (Y) имеет простирание около 18° , что совпадает с ориентировкой Карабулакского разлома. Вторичные разломы с простиранием около 300° соответствуют R'-сколам (сопряжённые сколы Риделя). Сравнение с модельными схемами для левого и правого сдвигов показало, что распределение тектонических трещин лучше согласуется с моделью под правый сдвиг. В этом случае ориентировка оси растяжения (σ_1) составляет 333° .

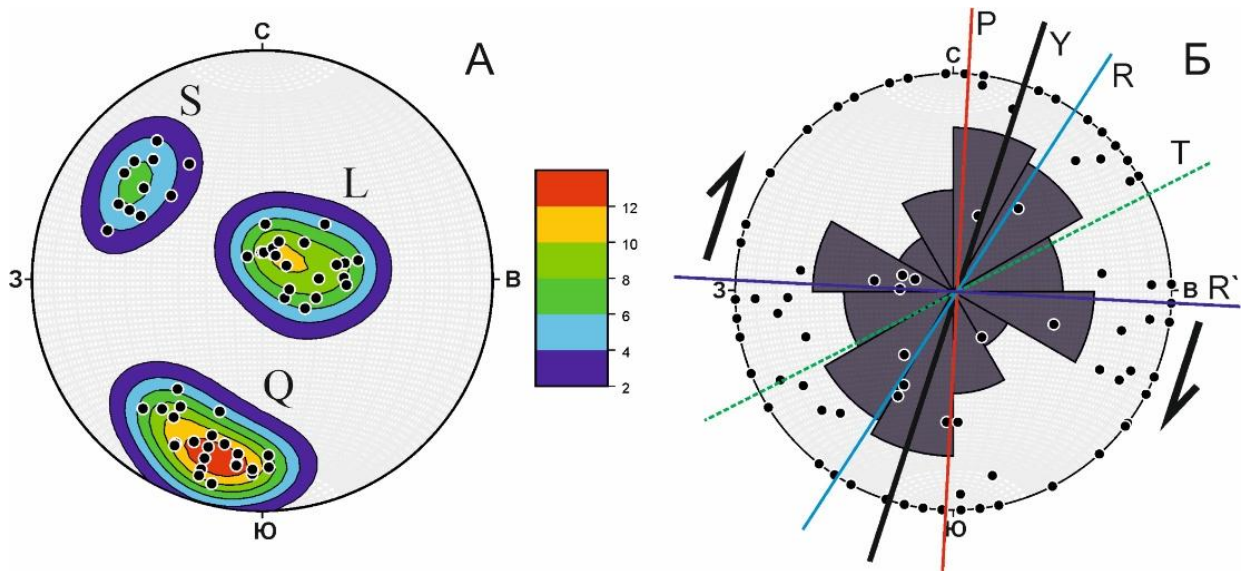


Рисунок 3 – Анализ трещиноватости Чекинского массива: А – протектонические трещины со статистическими контурами Камба (красные поля – наибольшая концентрация полюсов, фиолетовые поля – наименьшая концентрация полюсов). Латинскими буквами отмечены группы трещин. Б – тектонические трещины с расположением сколов и отрывов по системе Риделя при правом сдвиге. Y – генеральный разлом, R – R-сколы, P – P-сколы, R' – сопряженные сколы Риделя, T – трещины отрыва

Структурная модель Чекинского массива. Исходя из модели формирования, построенной для Чекинского массива на основании анализа тектонических трещин, ориентировка растяжения при правом сдвиге составляет 153° – 333° . Ориентировка растяжения по петромагнитным данным перпендикулярна простиранию плоскости K_{max} - K_{int} и составляет 138° – 318° . Хорошее схождение ориентировок осей/плоскостей растяжения по данным трещиноватости и AMS взаимно-верифицирует полученные данные и указывает на правильность интерпретации генерального сдвига Чекинского массива, как правостороннего. Таким образом, подтверждается, что Чекинский массив формировался в соответствии с моделью сдвигового магматического дуплекса в условиях правосторонней транстенсии на попутном изгибе Карабулакского взбросо-сдвига (рис. 4).

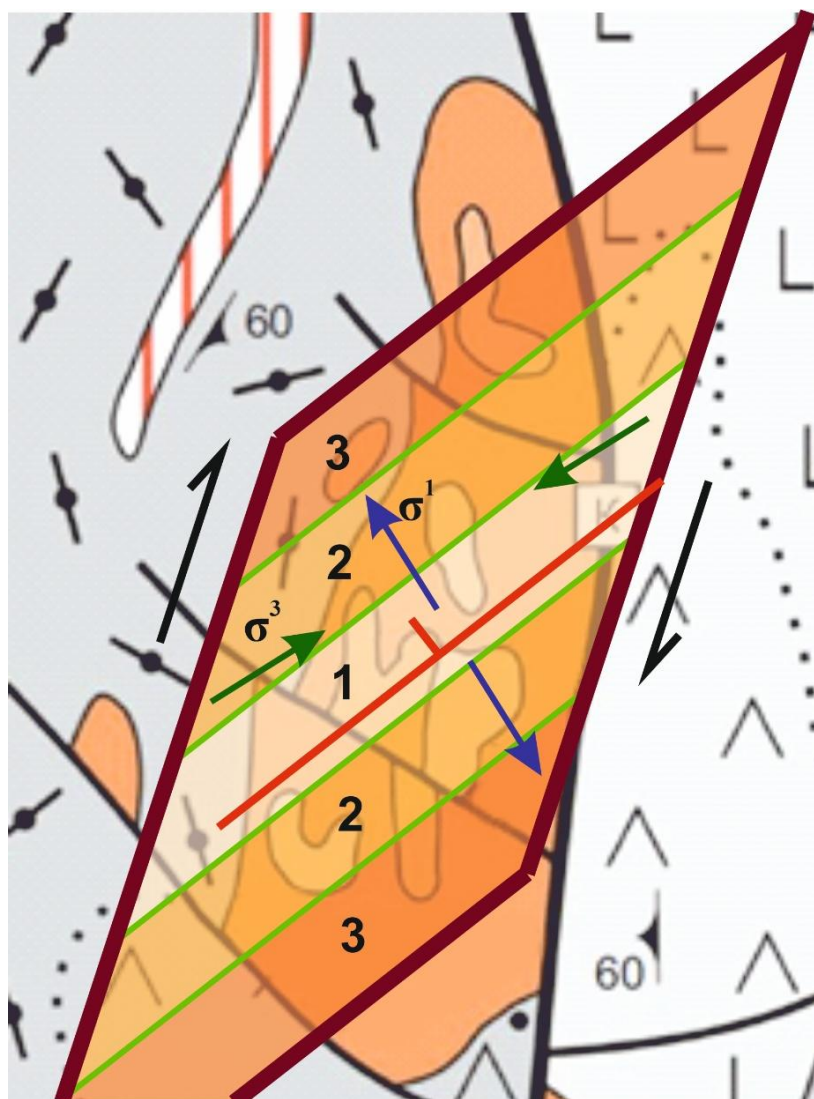


Рисунок 4 – Сопоставление данных структурного и петромагнитного анализа на Чекинском массиве. Синие стрелки – ориентировка растяжения. Зеленые стрелки – ориентировка сжатия. Красная линия – ориентировка течения магмы. Салатовые линии – трещины отрыва. Бордовые линии – сдвиговые разломы. Цифрами подписаны фазы внедрения

Петромагнитные исследования Чилектинского плутона. Магнитная минералогия пород Чилектинского плутона изучена на образцах с 11 точек. Магнитная восприимчивость (MS) пород варьирует в широких пределах – от 5×10^{-5} СИ (трахириолит, дайка) до 5872×10^{-5} СИ (монцодиориты).

Исследования магнитной минералогии пород плутона показали, что основным ферромагнитным минералом является магнетит. Гематит присутствует во всех фазах внедрения и его вклад достигает 24%.

Степень анизотропии (P_j) для всех сайтов Чилектинского плутона не превышает 6% (0,017–0,053), что указывает на отсутствие существенных наложенных деформаций. Параметр формы эллипсоида (T) варьирует от -0,39 до +0,35. Распределение главных осей AMS достаточно компактно, доверительные интервалы составляют 10–20° (редко до 45°). Направления главных осей AMS различаются по сайтам, что отражает сложную внутреннюю структуру плутона. Наблюдаются три типа магнитной текстуры, связывающейся с различной морфологией магматических тел – штоки, дайки и горизонтально залегающие тела (растекание магмы).

Магниторазведка на Чилектинском плутоне. Построена удовлетворительная магнитная модель (расхождение рассчитанного и обнаруженного поля 3,7%) (рис. 5). Контрастные аномалии (до 800 нТл) обусловлены не только различиями в магнитной восприимчивости фаз внедрения, но и разнонаправленностью вектора ЕОН: для краснинского комплекса характерны отрицательные наклонения, для чилектинского – положительные. Полученная модель согласуется с данными AMS и палеомагнитного анализа, подтверждая сложное внутреннее строение плутона.

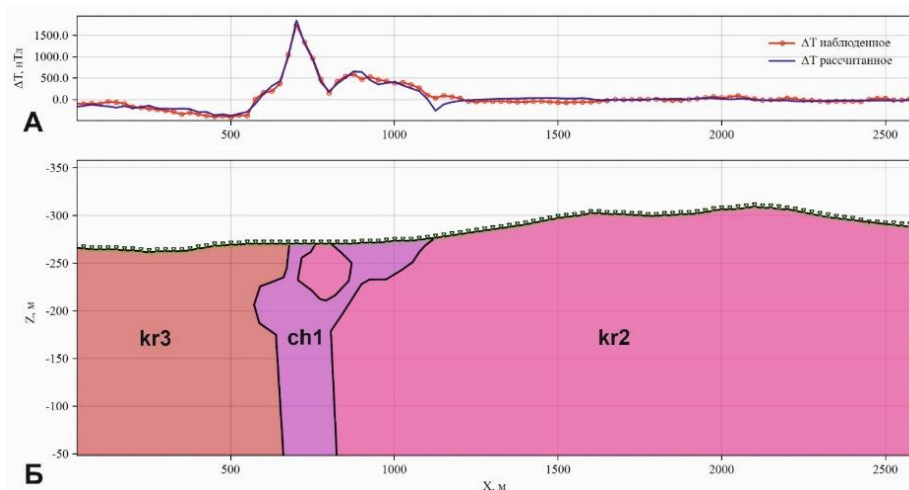


Рисунок 5 – Результативная магнитная модель по профилю 2, построенная с учетом суммарного вектора намагниченности (векторной суммы индуцированной и остаточной): А – кривые наблюдаемого (красная линия) и рассчитанного (синяя кривая) поля ΔT . Б – модельный разрез по профилю. kr3 – 3-я фаза краснинского комплекса; ch1 – 1-я фаза чилектинского комплекса; kr2 – 2-я фаза краснинского комплекса

При рассмотрении взаимоотношений фаз внедрения краснинского комплекса можно сделать предположение о том, что он формировался, как магматический сдвиговый дуплекс центробежного типа. В пользу этого свидетельствует: 1) расположение более древней 2-й фазы краснинского комплекса в центре, а более молодой на флангах; 2) западный контакт в виде большого регионального разлома; 3) вертикальные, меридионально вытянутые магматические тела, выявленные по данным AMS и магниторазведки, схожие с телами Чекинского массива.

Глава 6. Палеомагнитные исследования

Чекинский массив. Хаотическая палеомагнитная запись не позволяет сделать вывод о палеонахождении и движениях массива. Хаотическое распределение характеристических компонент (ChRM) говорит о полном перемагничивании пород массива и потери первичной компоненты намагниченности.

Чилектинский плутон. Качество палеомагнитной записи хорошее и связано с магнетитом. Выделены преимущественно высокотемпературные компоненты, реже низкотемпературные. Направления ChRM образуют четыре группы: 1) с южным склонением и небольшими углами наклона; 2) с разбросом склонений от северо-западного до юго-западного и повышенными наклонами относительно группы 1; 3) со средними отрицательными углами наклона (более -39°); 4) с высоким углом наклона. Рассчитанные виртуальные геомагнитные полюсы (ВГП) закономерно распределяются вдоль аппроксимированной дуги большого круга (рис. 6).

Для ВГП плутона посчитаны полюсы вращения Эйлера, которые подтвердили закономерность распределения ВГП. Распределение ВГП вдоль дуг больших кругов и схожие полюсы Эйлера указывают на вращение плутона во время его формирования. Параметры вращения блока Чилектинского плутона изменились по мере приближения Магнитогорской палеодуги к ВЕП и последующей коллизии. Локальное перемагничивание в раннем карбоне

зафиксировано только на сайте 14 (ВГП ложится на кривую ТКДП в интервале 325–310 млн лет).

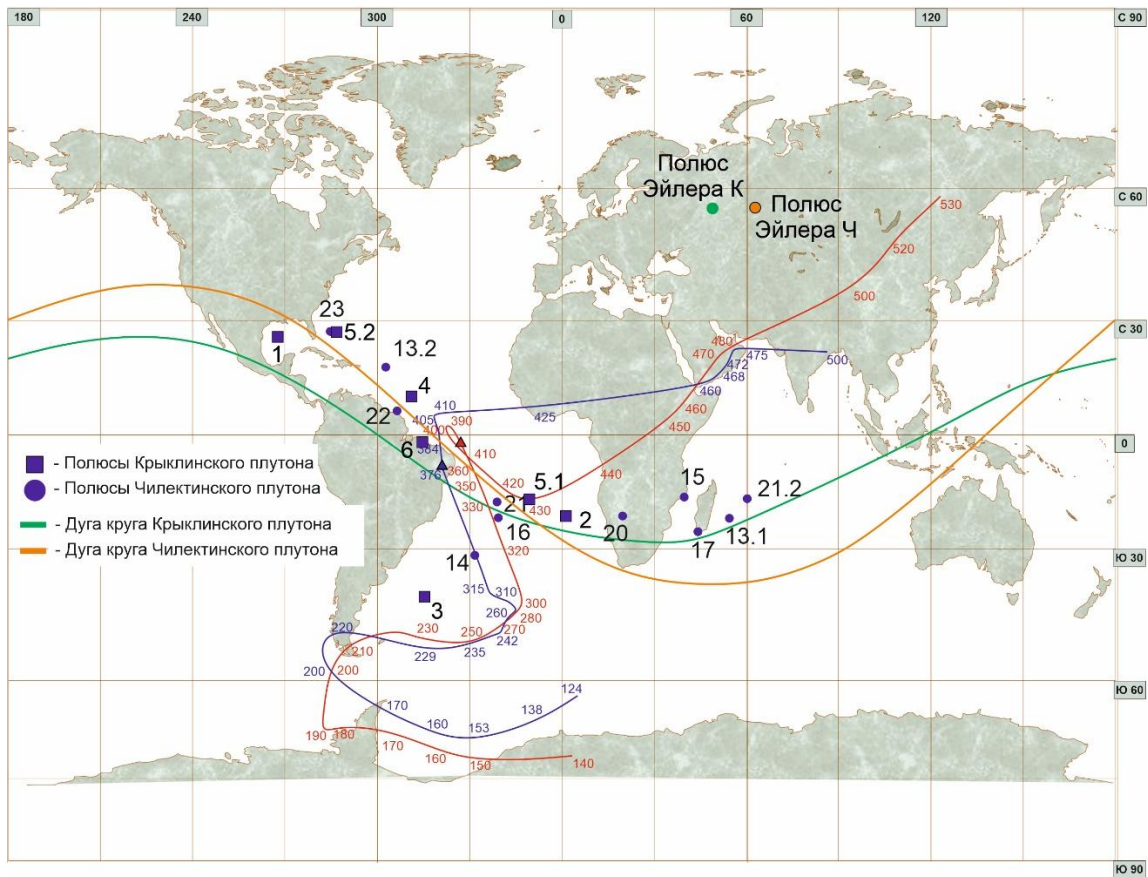


Рисунок 6 – Положение ВГП на Чилектинском и Крыклинском плутонах. Синими символами и цифрами обозначены группы сайтов – квадраты для Крыклинского плутона, круги для Чилектинского плутона. Красная кривая и цифры данные о ТКДП Балтики по (Torsvik et al., 2012). Красный треугольник – полюс соответствующий возрасту 380 млн. лет по Торсвику. Сине-фиолетовая кривая и цифры – данные ТКДП ВЕП по (Иосифиди, Храмов, 2013). Сине-фиолетовый треугольник – полюс соответствующий возрасту 377 млн. лет по Иосифиди. Оранжевая линия – группа ВГП Чилектинского плутона. Зеленая линия – ВГП Крыклинского плутона

Крыклинский плутон. Выделены высокотемпературные и низкотемпературные компоненты намагниченности. Направления ChRM образуют веер склонений схожий с Чилектинским плутоном. Рассчитанные ВГП для шести групп сайтов распределяются вдоль дуги большого круга (рис. 6). Полюсы Эйлера для всего плутона сходятся к единому полюсу, что свидетельствует о вращении блока Крыклинского плутона относительно ВЕП.

Перемагничивание пород в триасе зафиксировано лишь для группы 3 (ВГП совпадает с триасовым полюсом).

Полученные палеомагнитные данные по двум plutонам показывают «банановое» распределение ВГП, что сходится с литературными данными по региону (Данукалов и др., 2018; Правикова и др., 2025б, 2026) и указывает на глобальные процессы внутриблоковых вращений для Магнитогорской и Восточно-Уральской мегазон. Наиболее вероятные механизмы вращений описаны в работе Веллса и Хеллера (Wells, Heller, 1988).

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты исследования строения, механизмов формирования и истории развития интрузивных plutонических комплексов восточного склона Южного Урала включают:

1. Верифицирована кинематическая модель формирования Чекинского триасового массива по структурным и петромагнитным данным. Модель отражает образование сдвигового магматического дуплекса центробежного типа, сформировавшегося в условиях правосторонней трансенсии. Подтвержден возраст Чекинского массива как триасового на основе данных о захвате зерен цирконов (датированных раннекаменноугольной эпохой) из вмещающих пород.
2. Разработана кинематическая модель формирования девонского полихронного Чилектинского plutона. Pluton формировался в качестве сдвигового магматического дуплекса в условиях левосторонней трансенсии на попутном изгибе одноименного сдвига. В состав дуплекса входит впервые выделенный позднедевонский plutонический чилектинский комплекс с возрастом 380 млн лет.
3. Установлены внутриблоковые сдвиговые вращения Чилектинского и Крыклинского plutонов по палеомагнитным данным. Породы Чекинского массива подверглись перемагничиванию.

Сравнительный анализ характеристик плутонов позволил выявить особенности формирования гранитоидных плутонов на Южном Урале в различных условиях: 1) в девонском периоде в ходе развития тектонических блоков (Магнитогорской палеодуги и Восточно-Уральских террейнов) до коллизии с ВЕК, но при левосторонних движениях вызванных быстрым движением ВЕК на восток; 2) в каменноугольном периоде при активной фазе коллизии крупных тектонических блоков с ВЕК и последовавшей релаксации связанной с орогенным коллапсом; 3) в триасовом периоде вследствие рифтогенных процессов. Фактором формирования всех плутонов были тектонические движения, представленные региональными и локальными сдвиговыми разломами, связанными с косой коллизией тектонических блоков с ВЕК. Влияние этих сдвигов наиболее заметно в тектонически ослабленных зонах – на краях тектонических зон и в их ядре. Описанный тектонический режим приводит к формированию плутонов, как магматических дуплексов на изгибах сдвиговых разломов и приводит к вращению блоков.

Использование комплекса взаимодополняющих геофизических методов даёт информацию о строении и механизмах формирования плутонов, позволяет верифицировать полученные сведения для получения достоверной информации о характеристиках плутонов. Данный комплекс методов эффективен при анализе сложных объектов таких, как плутоны с высокой ЕОН.

Дальнейший прогресс в понимании строения и механизмов формирования плутонов на Южном Урале может быть достигнут при: 1) наращивании объема информации по другим мало исследованным плутонам для уточнения истории региональных тектонических условий; 2) детализации сведений о строении плутонов с расширением комплекса геофизических методов, включающих площадную магниторазведку и электроразведку с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для проведения магниторазведочных работ на больших площадях, а также аудио-магнитотеллурическое зондирование (АМТЗ) для построения геоэлектрических разрезов на высокоомных объектах, к которым относятся и гранитоидные плутоны.

Проведенные исследования вносят вклад в обсуждение возможностей применения новых методических подходов для анализа нестратифицированных геологических объектов исследования с непростой морфологией и разнообразными петрофизическими характеристиками.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность своим научным руководителям А.В. Тевелеву за большой вклад в научную работу и всестороннюю помощь и И.Н. Модину за консультации по геофизике и помощь при написании научной работы.

Автор искренне признателен научному коллективу гранта за разностороннюю помощь, в частности Н.В. Правиковой за консультации по геологии региона и оформлению работы.

Большая часть лабораторных исследований проводилась в лаборатории палеомагнетизма ГИН РАН под руководством В.Ю. Водовозова. Автор признателен коллективу лаборатории за помощь в обработке материалов и возможности работать на высокоточных приборах. Автор благодарит сотрудников лаборатории палеомагнетизма и магнетизма горных пород Казанского Федерального Университета за помощь в обработке материалов для магнитной минералогии и предоставление приборов для использования.

Автор искренне признателен А. Ю. Паленову за значительную помощь в обработке данных магниторазведки и консультации по этой тематике.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук:

1. **Шестаков П.А.**, Казанский А.Ю., Тевелев А.В., Коптев Е.В., Володина Е.А., Борисенко А.А. Петромагнитные исследования Чилектинского плутона Южного Урала // Геофизика. 2024а. № 6. С. 94–99. EDN: IWFTBQ. Импакт-фактор 0,342 (РИНЦ). 0,69 п.л., вклад автора – 20%.

2. **Шестаков П.А.**, Казанский А.Ю., Тевелев А.В., Правикова Н.В., Коптев Е.В., Володина Е.А., Борисенко А.А., Кошелева И.А. Структурная эволюция Чекинского массива (Южный Урал): петромагнитные исследования и анализ трещиноватости // Геодинамика и тектонофизика. 2024б. Т. 15. № 6. С. 0792. EDN: NOPIAC. Импакт-фактор 0,779 (РИНЦ). 1,8 п.л., вклад автора – 20%.
3. Тевелев А.В., **Шестаков П.А.**, Володина Е.А., Тихвинская А.А. Новые данные о строении и возрасте Чилектинского гранитоидного массива (Южный Урал) // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2025. Т. 64. № 6. С. 37–48. EDN: ESAMJW. Импакт-фактор 0,478 (РИНЦ). 2,2 п.л., вклад автора 30%.
Tevelev, A.V., **Shestakov, P.A.**, Volodina, E.A., Tihvinskaya A.A. New data on the structure and age of the Chilekta granitoid plutonic massif (Southern Urals) // Moscow University Geology Bulletin. 2026. vol. 81. № 1. pp. 38–50. EDN: KGSNQM. Импакт-фактор 0,4 (SJР). 1,5 п.л., вклад автора 30%.
4. Правикова Н.В., Казанский А.Ю., Тевелев А.В., Коптев Е.В., **Шестаков П.А.**, Володина Е.А., Тихвинская А.А. Новые изотопные и палеомагнитные данные по раннекаменноугольному березовскому комплексу Магнитогорской зоны (Южный Урал). Статья 1. Изотопные датировки и геохимические характеристики // Геодинамика и тектонофизика. 2025. Т. 16. № 6. С. 0862. EDN: XRWUQK. Импакт-фактор 0,779 (РИНЦ). 2,3 п.л., вклад автора 10%.
5. Правикова Н.В., Казанский А.Ю., Тевелев А.В., Коптев Е.В., **Шестаков П.А.**, Володина Е.А., Тихвинская А.А. Новые изотопные и палеомагнитные данные по раннекаменноугольному березовскому комплексу Магнитогорской зоны (Южный Урал). Статья 2. Петромагнитные и палеомагнитные исследования и их кинематические следствия // Геодинамика и тектонофизика. 2026. Т. 17. № 1. С. 0875. EDN: VQENOO. Импакт-фактор 0,779 (РИНЦ). 1,96 п.л., вклад автора 10%.