

УДК 550.38

МЕХАНИЗМ ВНЕДРЕНИЯ РАННЕКАМЕННОУГОЛЬНОГО НЕПЛЮЕВСКОГО МАССИВА ПО ПЕТРОМАГНИТНЫМ ДАННЫМ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

Егор Владимирович Коптев¹✉, Алексей Юрьевич Казанский²,
Александр Вениаминович Тевелев³, Наталья Витальевна Правикова⁴,
Александра Андреевна Борисенко⁵, Екатерина Алексеевна Володина⁶

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; coptevegor@gmail.com ✉, <https://istina.msu.ru/profile/EVKoptev/>

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; Геологический институт РАН, Москва, Россия; kazansky_alex@ngs.ru, https://istina.msu.ru/profile/kazansky_alex/

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; ООО НТПП «Геопоиск», Челябинск, Россия; atevelev@yandex.ru, https://istina.msu.ru/profile/AI_Tevelev-1970/

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; npravikova@mail.ru, <https://istina.msu.ru/profile/npravikova/>

⁵ Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья имени Н.М. Федоровского, Москва, Россия; borsanya@yandex.ru, <https://istina.msu.ru/profile/alexbor/>

⁶ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; ООО НТПП «Геопоиск», Челябинск, Россия; ekaterina.volodina2015@yandex.ru, <https://istina.msu.ru/profile/VolodinaEA/>

Аннотация. Представлены первые данные о анизотропии магнитной восприимчивости пород раннекаменноугольного Неплюевского полифазного массива, расположенного в южной части Восточно-Уральской мегазоны. Рассмотрены особенности магнитной минералогии пород всех фаз внедрения массива; показано, что ведущую роль в формировании магнитных свойств пород играют изотропная популяция многодоменного магнетита и популяции однодоменного магнетита, вносящие основной вклад в анизотропию магнитной восприимчивости. Рассмотрены параметры AMS, характерные для пород каждой фазы, доказана магматическая (прототектоническая) природа анизотропии. На основании анализа магнитных текстур предложена модель становления Неплюевского массива по механизму сдвигового магматического дуплекса в обстановке левосторонней трансенсии.

Ключевые слова: Неплюевский массив, гранитоиды, магнитная минералогия, анизотропия магнитной восприимчивости

Для цитирования: Коптев Е.В., Казанский А.Ю., Тевелев А.В., Правикова Н.В., Борисенко А.А., Володина Е.А. Механизм внедрения раннекаменноугольного Неплюевского массива по петромагнитным данным (Южный Урал) // Вестн. Моск. ун-та. Серия 4. Геология. 2023. № 1. С. 35–45. doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-1-35-45

THE EMPLACEMENT MECHANISM OF THE EARLY CARBONIFEROUS NEPLUYEVKA BATHOLITH ACCORDING TO PETROMAGNETIC DATA (SOUTHERN URALS)

Egor V. Koptev¹✉, Alexey Yu. Kazansky², Alexander V. Tevelev³,
Natalia V. Pravikova⁴, Alexandra A. Borisenko⁵, Ekaterina A. Volodina⁶

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; coptevegor@gmail.com ✉, <https://istina.msu.ru/profile/EVKoptev/>

² Lomonosov Moscow State University; Geological Institute of RAS, Moscow, Russia; kazansky_alex@ngs.ru, https://istina.msu.ru/profile/kazansky_alex/

³ Lomonosov Moscow State University; “Geopoisk” Ltd., Chelyabinsk, Russia; atevelev@yandex.ru, https://istina.msu.ru/profile/AI_Tevelev-1970/

⁴ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; npravikova@mail.ru, <https://istina.msu.ru/profile/npravikova/>

⁵ Fedorovsky All-Russian scientific research institute of mineral resources, Moscow, Russia; borsanya@yandex.ru, <https://istina.msu.ru/profile/alexbor/>

⁶ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; “Geopoisk” Ltd., Chelyabinsk, Russia; ekaterina.volodina2015@yandex.ru, <https://istina.msu.ru/profile/VolodinaEA/>

Abstract. In this article we present the first data on the anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) for the rocks of the Early Carboniferous Nepluyevka polyphase pluton, which is situated in the southern part of the East Urals megazone. We consider the properties of magnetic mineralogy of all phases of the batholith, and show that the leading role in determining the magnetic properties of the rocks belongs to an isotropic grain population of MD magnetite and multiple populations of SD magnetite, which are the chief contributors to AMS. We consider the characteristic parameters of AMS for each phase, and show that the AMS is magmatic (non-deformational) in nature. An emplacement mechanism of “magmatic duplex” developing in a kinematic setting of sinistral transtension is proposed for the batholith, based on the analysis of the characteristic magnetic fabrics.

Key words: Nepluyevka pluton, granitoids, magnetic mineralogy, anisotropy of magnetic susceptibility

For citation: Koptev E.V., Kazansky A.Yu., Tevelev A.V., Pravikova, N.V., Borisenko A.A., Volodina E.A. The emplacement mechanism of the Early Carboniferous Nepluyevka batholith according to petromagnetic data (the Southern Urals). *Moscow University Geol. Bull.* 2023; 1: 5–45. doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-1-35-45. (In Russ.).

Введение. Массивы гранитоидов в структуре складчатых областей — важнейшие архивы геодинамической информации, как о истории становления самих массивов, так и о эволюции тектонической единицы, в которой они развиваются. Традиционно для расшифровки этой информации используют главным образом структурно-геологические методы — изучение пространственной ориентировки прототектонических структур и структур, возникших в результате последующих деформаций. В последние годы для решения подобных задач стали активно применять магнитные методы, в частности исследования анизотропии магнитной восприимчивости (AMS), которая тесно связана с ориентировкой минеральных зерен в породе, а также фиксирует последующие деформации [Kratinova et al., 2006; Benn, 2010; Žák et al., 2012; Georgiev et al., 2014 и др.]. Анализ анизотропии магнитной восприимчивости (магнитной текстуры) позволяет реконструировать направления течения расплава или, в случае ее деформационной природы, направление главных осей напряжений [Tarling, Hrouda, 1993].

К сожалению, для массивов Южного Урала со сложнопостроенной структурой такие исследования пока не проводились, поэтому изучение возможностей применения метода анизотропии магнитной восприимчивости (AMS) на массивах с известным механизмом внедрения представляют актуальную задачу. Для ее решения был выбран раннекаменноугольный [Тевелев и др., 2021] Неплюевский массив, для которого на основании имеющихся сведений о возрастных соотношениях и пространственном распределении фаз была предложена модель формирования по механизму сдвигового магматического дуплекса [Тевелев, 1998]. Однако породы всех фаз внедрения обладают массивной текстурой, что затрудняет создание достоверной модели распределения направлений течения расплава в магматической камере и, соответственно, установление механизма внедрения массива и кинематической обстановки его формирования.

Для преодоления этого препятствия мы применили анализ параметров анизотропии магнитной восприимчивости, так как даже визуально изотропные гранитоиды всегда характеризуются ориентированной магнитной текстурой [Bouchez, 1997].

Краткая геологическая характеристика. Неплюевский массив представляет собой раннекаменноугольный полифазный батолит, расположенный в центральной подзоне Кочкарско-Адамовской структурно-формационной зоны в южной части Восточно-Уральской мегазоны (рис. 1).

Время формирования плутона отвечает раннесудетскому этапу геологического развития Вос-

точно-Уральской мегазоны, характеризующемуся сложным чередованием обстановок транспрессии и чистого сдвига. Это чередование, по всей видимости, было связано с перестройками кинематического режима зоны субдукции, предшествующими поздне-визейской коллизии между Восточно-Европейским и Казахстанским палеоконтинентами. Эти трансформации кинематических обстановок в значительной степени определили характер тектоно-магматической эволюции южной части Восточно-Уральской мегазоны, поэтому их изучение представляет интерес для восстановления тектонической истории региона.

В последних работах, посвященных этому массиву, основное внимание уделено его изотопии и петрохимии [Попов и др., 2003; Тевелев и др., 2018; Осипова и др., 2018; Сначев и др., 2019; Тевелев и др., 2022]. Полученные в указанных работах геохимические данные противоречивы и не позволяют однозначно определить геодинамическую обстановку формирования плутона. Вероятно, по этой причине Неплюевский массив, несмотря на принадлежность к группе представительных интрузивов Главной гранитной оси Урала, значительную (до 400 км²) площадь контура и удовлетворительную обнаженность, не упоминается в важнейших работах, освещающих закономерности палеозойской эволюции магматизма Южного Урала [Ферштатер, 2013] и закономерности уральской геодинамики [Пучков, 2000]. Тем не менее датировки пород массива, полученные в ходе изучения Rb-Sr [Попов и др., 2003; Тевелев и др., 2018], Sm-Nd [Тевелев и др., 2018], Lu-Hf [Осипова и др., 2018] и U-Pb [Осипова и др., 2018; Тевелев и др., 2022] изотопных систем формируют непротиворечивую картину. Для пород всех фаз внедрения Неплюевского массива мы будем использовать датировки, полученные в работе [Тевелев и др., 2022].

Большая часть сведений о геологическом устройстве массива получена в результате подготовки листов N-40-XXIV, XXX [Мосейчук и др., 2013] и N-41-XXV [Тевелев и др., 2018] комплектов Госгеолкарты-200 и геологической карты масштаба 1:1 000 000 [Карта дочетвертичных..., 2001].

В составе Неплюевского батолита традиционно выделяют четыре интрузивные фазы, характеризующиеся гомодромной последовательностью внедрения: 1) габбро и диориты; 2) гранодиориты (U-Pb 356±3 млн лет); 3) адамеллиты (U-Pb 354±6 млн лет); 4) лейкограниты (Rb-Sr 340±2,6 млн лет). В плане массив имеет форму, близкую к параллелограмму, его видимые границы попарно субпараллельны: западная и восточная границы имеют северо-северо-западное простирание, северная и южная границы простираются на запад-северо-запад. Весь массив

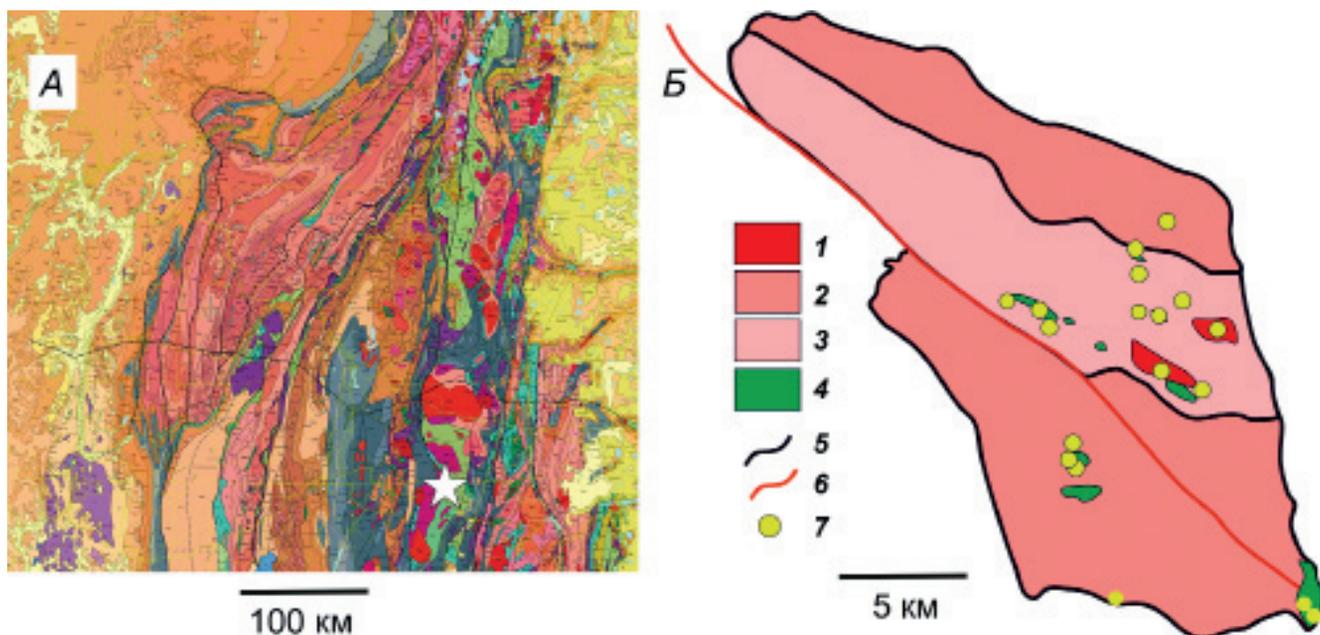


Рис. 1. Положение Неплюевского массива в структуре Южного Урала по [Козлов и др., 2001] (А) и схема геологического строения Неплюевского массива (Б): 1 — лейкограниты 4-й фазы, 2 — адамеллиты 3-й фазы, 3 — гранодиориты 2-й фазы, 4 — габброиды 1-й фазы, 5 — геологические границы, 6 — Неплюевский разлом, 7 — точки отбора образцов

рассечен разломом северо-западного простирания, далее именуемым Неплюевским.

Первые три фазы массива закономерно распределены относительно этого разлома, границы областей распространения различных фаз параллельны широтным контактам самого плутона. Выходы габброидов и диоритов занимают малую часть площади массива. Они приурочены к его центральной части и цепочкой вытянуты вдоль Неплюевского разлома. Сравнительно крупное по площади тело габброидов (1,8 км²) расположено на самом юго-западе массива. Большая часть гранодиоритов 2-й фазы сосредоточена в составе единого тела, находящегося непосредственно на севере от Неплюевского разлома. Адамеллиты 3-й фазы слагают практически всю часть массива, расположенную к югу от Неплюевского разлома, а также занимают существенную площадь у его северной субширотной границы. Лейкограниты 4-й фазы представлены серией даек и малых тел неправильной формы площадью до 1 км², рассеянных по всей площади выходов Неплюевского массива, но тяготеющих к его центральной и южной частям.

Материалы и методы исследований. Отбор образцов проводился на 18 точках (сайтах), равномерно распределенных по восточной части площади выходов пород Неплюевского массива, охватываемой листом N-41-XXV Госгеолкарты-200. В результате полевых работ собрана коллекция образцов, достаточная, чтобы охарактеризовать все фазы внедрения Неплюевского массива. Отбор образцов проводился как выбуриванием ориентированных кернов с помощью портативного электробура, так и вручную в виде ориентированных штуфов. Местное магнитное склонение учитывали с помощью солнечного ком-

паса либо необходимую поправку рассчитывали по модели IGRF-12 [Thébault et al., 2015]. Всего отобрано 186 ориентированных образцов — 160 цилиндров и 26 штучных проб.

Для установления связи между параметрами анизотропии магнитной восприимчивости пород и их скрытыми текстурными характеристиками их магнитная минералогия проанализирована методами дифференциального термомагнитного анализа (ДТМА) с использованием весов Кюри конструкции П.Г. Ясонова (КФУ) [Буров, Ясонов, 1979]. Измерения выполнены в ходе двух последовательных нагревов одного и того же образца в постоянном поле 400 мТл. Разложение коэрцитивных спектров образцов (КС), полученных на коэрцитивном спектрометре J_meter конструкции П.Г. Ясонова [Jasonov et al., 1998], выполнено с помощью веб-приложения MAX UnMix (<http://shinyapps.its.carleton.edu/max-unmix/>) [Maxbauer et al., 2016], позволяющего подобрать компоненты магнитных фаз к общей кривой нормального намагничивания. Максимальное значение магнитной индукции поля при работе J_meter составляло 1,5 Тл. Для анализов отобраны 12 представительных образцов. Анализ магнитной минералогии проводили в лаборатории палеоклиматологии, палеоэкологии и палеомагнетизма КФУ (Казань). Изучение параметров анизотропии магнитной восприимчивости выполнено в лаборатории палеомагнетизма ГИН РАН на аппарате MFK1-FA типа каппа-мост производства AGICO (Чехия). Измерения для каждого образца проводили дважды: до начала экспериментов по размагничиванию и после нагрева до T=450 °C, чтобы исключить влияние на анизотропию некоторых минералов вторичного

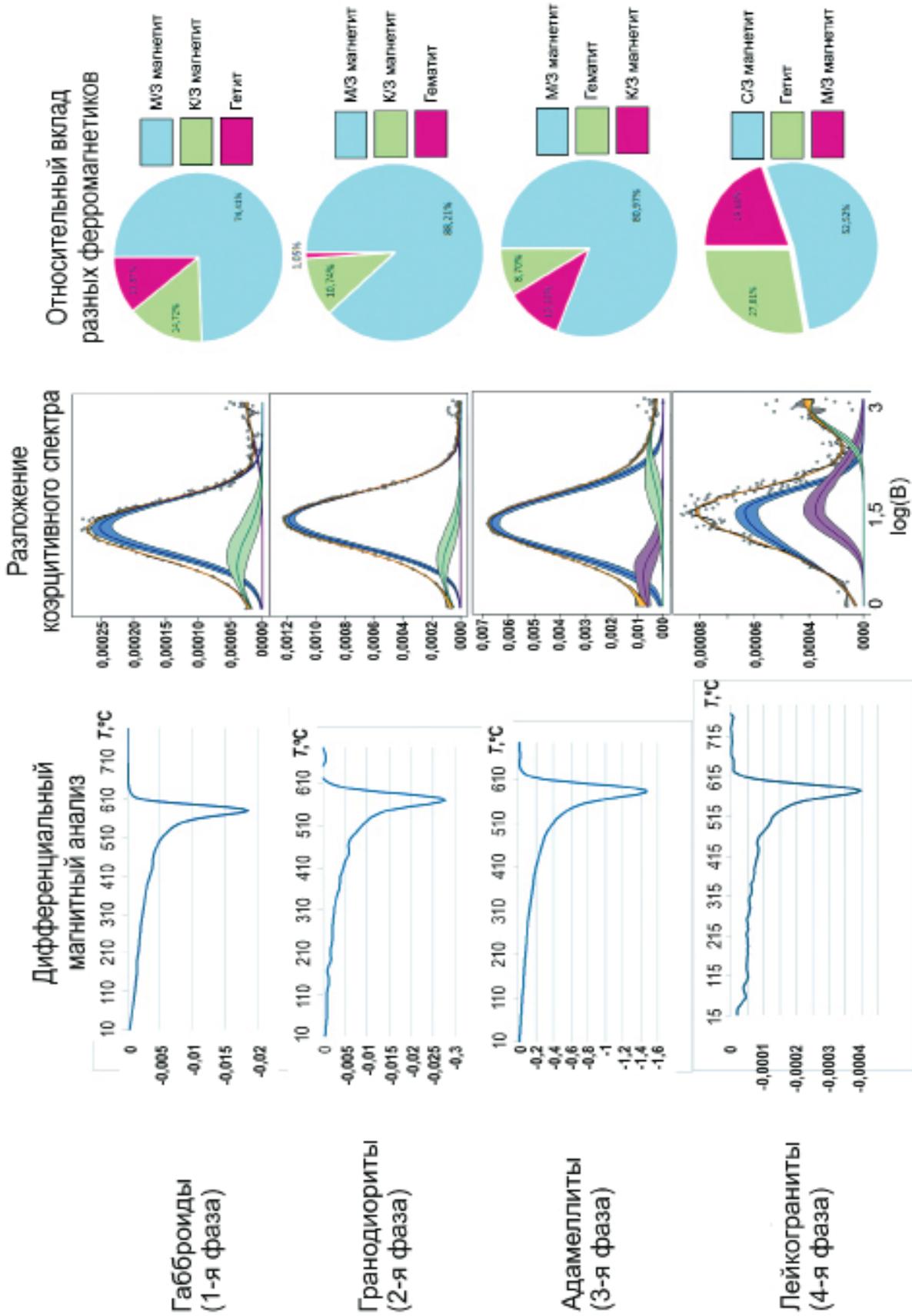


Рис. 2. Результаты анализов магнитной минералогии пород Неплюевского массива. Слева — кривые ДТМА (первый нагрев; по горизонтальной оси — температура, по вертикальной — производная индуцированной остаточной намагниченности по температуре), в центре результаты разложения коэрцитивных спектров (по горизонтальной оси — десятичный логарифм индукции приложенного поля, по вертикальной оси — производная магнитного момента по логарифмированному значению индукции приложенного поля), справа — круговые диаграммы вклада намагниченности разных минералов в общую намагниченность

происхождения: минералов группы гётита—гидрогётита и сульфидов. Прогрев позволил значительно увеличить кучность распределения главных осей эллипсоидов анизотропии магнитной восприимчивости.

Результаты исследований и их обсуждение.

Магнитная минералогия. Габброиды. Все образцы габброидов демонстрируют минимум на кривой производной температурного размагничивания (кривой ДТМА) в области 555–580 °С, что свидетельствует о наличии в их составе магнетита с разным содержанием титана, но отличным от нуля [Dunlop, Özdemir, 1997], и позволяет гарантировать его магматическое происхождение. Три из пяти образцов габброидов также характеризуются минимумами кривых ДТМА в диапазонах 150–200 и 340–370 °С, что отвечает диапазонам значений температуры Кюри для гидроксидов железа и высокотитанистого магнетита [Dunlop, Özdemir, 1997] (рис. 2). Наличие этих минералов указывает на вторичные изменения, затронувшие породы 1-й фазы. Исследования петель гистерезиса габброидов подтвердило наличие в них ферромагнитных (в широком смысле) минералов. Для четырех из пяти образцов габброидов вклад магнито жестких минералов в намагниченность мал (до 16%) (рис. 2).

Моделирование коэрцитивного спектра позволило выявить следующий состав ферромагнитной фракции: мелкозернистый магнетит вносит вклад в общую намагниченность образца в размере 60–94%. Второй по значимости — крупнозернистый магнетит (до 20%). В большинстве образцов продукты окисления — минералы группы маггемита—гематита и ряда гётита—гидрогётита — вносят в общую намагниченность вклад в несколько процентов (рис. 2).

Гранодиориты. К гранодиоритам 2-й фазы внедрения относятся два исследованных образца. Оба образца имеют минимум в области 570 °С, отвечающий низкотитанистому магнетиту. Пики, отвечающие области температуры Кюри сульфидов и гидроксидов, практически не выражены (рис. 2). Анализ кривой гистерезиса образцов показывает различное соотношение ферромагнитных и парамагнитных минералов. В случае образца у046 (сайт 2420) вклад ферромагнетиков в начальную (в малых полях) магнитную восприимчивость превышает вклад парамагнетиков на 2 порядка, в случае образца у164 (сайт 4084) парамагнитная и ферромагнитная восприимчивости имеют один порядок. По данным моделирования коэрцитивного спектра удалось установить соотношение вкладов ферромагнитных минералов в общую изотермическую остаточную намагниченность для наименее измененных разностей гранодиоритов. Для них вклад высококоэрцитивного, мелкозернистого магнетита превышает 88%, крупнозернистый магнетит вносит немного менее 11%, на долю гематита приходится 1% (рис. 2).

Адамеллиты. В ходе работ проанализировано три образца адамеллитов. Единственный минимум

производной кривых температурного размагничивания для адамеллитов находится в области 580–585 °С, т. е. близок к максимально возможной температуре Кюри низкотитанистого магнетита (рис. 2), что может указывать на его гидротермальное происхождение. Исследование кривых гистерезиса образцов адамеллитов вновь показало присутствие в породе ферромагнитных (в широком смысле) минералов.

В адамеллитах ферромагнетики вносят в начальную магнитную восприимчивость на 2–3 порядка больший вклад, чем парамагнетики. Во всех образцах в значимом для намагниченности количестве выявлены магнито жесткие минералы — признаки гидротермальных изменений. Как и в предыдущих фазах, ведущую роль в формировании намагниченности играет мелкозернистый магнетит (немного менее 81%), подчиненное значение имеют крупнозернистый магнетит (10,33%) и гематит (8,70%) (рис. 2).

Лейкограниты. Для анализа магнитной минералогии выбраны два образца лейкогранитов. В случае более показательного образца основной минимум производной кривой температурного размагничивания приходится на 580 °С, что свидетельствует о наличии низкотитанистого, вероятно, гидротермального магнетита. Породы этой фазы характеризуются минимальной среди изученных образцов индуктивной намагниченностью насыщения (рис. 2). Анализ петель гистерезиса показывает, что вклад парамагнетиков в начальную магнитную восприимчивость в обоих случаях на порядок меньше вклада ферромагнетиков. В обоих случаях вычисленный вклад зерен магнито жестких минералов при первичном анализе ($HIRM\ 0-1,13 \cdot 10^{-6}$ при остаточной намагниченности $5,85 \cdot 10^{-5}$ А·м²/кг) незначителен (рис. 2).

Анализ коэрцитивного спектра, однако, дает иные результаты и выделяет лейкограниты среди остальных фаз (рис. 2). Для демонстрации был выбран образец с большей намагниченностью насыщения, поскольку во втором образце намагниченность насыщения находится на пределе чувствительности прибора, и линия производной кривой намагничивания сильно зашумлена. Ведущая роль в формировании намагниченности образца принадлежит среднезернистому магнетиту (52,52%). На втором месте находится гётит (27,81%). Наименьший вклад вносит мелкозернистый магнетит (19,68%).

Для анализа доменного состояния по результатам анализа параметров гистерезиса образцов (соотношения остаточной и индуцированной намагниченностей насыщения и остаточной и простой коэрцитивной силы) построена диаграмма Дэя—Данлопа [Day et al., 1977; Dunlop, 2002a, b] (рис. 3). Большинство образцов лейкогранитов и гранодиоритов расположено в области псевдооднодоменных частиц, т. е., по представлениям [Dunlop, 2002a, b; Dunlop, Carter-Stiglitz, 2006], магнетик в

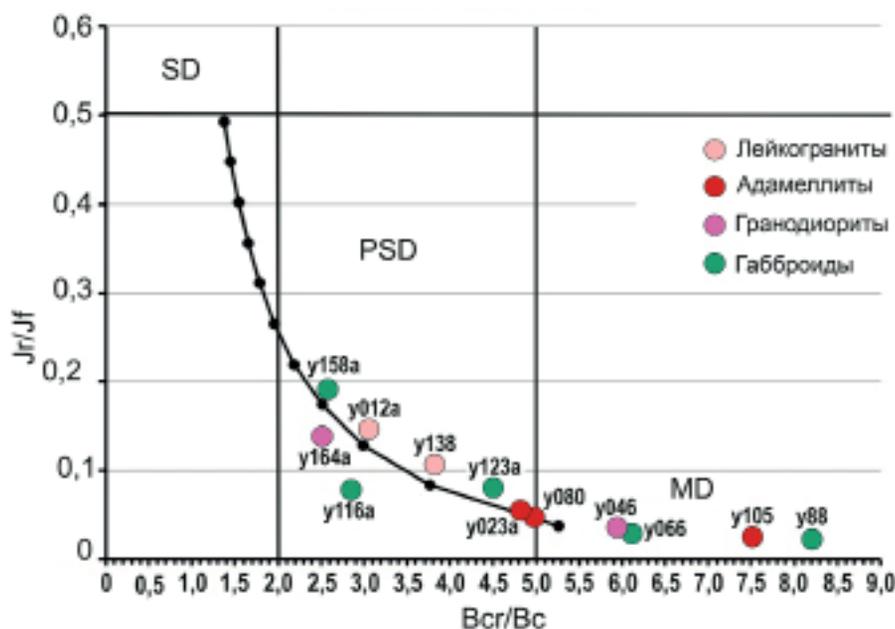


Рис. 3. Диаграмма Дя–Данлопа для изученных образцов

них представляет собой смесь однодоменных (ОД) и многодоменных (МД) частиц в разной пропорции. Исключения представляют образцы адамеллитов и часть образцов габброидов, где магнетик представлен исключительно многодоменными частицами.

Анизотропия магнитной восприимчивости.

Габброиды 1-й фазы характеризуются плоскостными магнитными текстурами (уплощенная форма эллипсоидов AMS). В образцах из сайта 2108a в центральной части массива наблюдается удлиненная (сигарообразная) форма эллипсоида AMS.

Во всех частях массива ориентировка коротких осей эллипсоидов анизотропии крутая или субвертикальная, кроме сайта 2421a. Вероятно, тело габброидов на этом сайте представляет собой ксенолит или каплю базитового расплава, находящегося в массе гранодиоритов 2-й фазы. В пользу гипотезы ксенолита косвенно свидетельствует сходство параметров K , T и P_j этого аномального сайта и остальных сайтов габброидов, характеризующихся плоскостными магнитными текстурами (рис. 4).

Гранодиориты 2-й фазы. Для этих пород характерна трехосная форма эллипсоидов AMS. Значения параметра T (мера уплощенности эллипсоида) для большинства образцов положительны. Это означает, что для породы в целом характерна плоскостная магнитная текстура. По всей видимости, трехосная форма эллипсоидов связана с изменениями первичной формы зерен магнетита, произошедшими в ходе деформации всего массива.

Короткие оси эллипсоидов, во всех случаях кроме одного, падают на юго-юго-восток под углами 30–60°. Длинные оси эллипсоидов анизотропии (K_{\max}) ориентированы разнообразно, вблизи контактов тела гранодиоритов — часто субперпендикулярно поверхности контакта (рис. 4).

Адамеллиты 3-й фазы обладают двухосными и трехосными эллипсоидами AMS, во всех случаях параметр уплощения $T > 0$, что свидетельствует о

доминировании плоскостных магнитных текстур. Трехосные эллипсоиды наблюдаются преимущественно в приконтактных частях крупных тел адамеллитов и в малых телах адамеллитов, т. е. в областях, предположительно подвергавшихся наиболее интенсивной деформации на протяжении тектонической истории массива.

Ориентировка коротких осей эллипсоидов анизотропии магнитной восприимчивости отчетливо отличается в разных частях массива. В южной части она падает на северо-восток: полого (15–20°) у контакта и круто (45°) в центральной части массива. В северной части наблюдаются ориентировки, симметричные тем, которые характерны для южной части: линейность падает на юго-запад под углом 15–45°. Длинные оси эллипсоидов анизотропии на сайтах, характеризующихся трехосной формой эллипсоида AMS, ориентированы субнормально к контактам (рис. 4).

Лейкограниты 4-й фазы. Здесь отобран только один сайт со статистически значимым числом образцов ($N = 9$). Средний эллипсоид — трехосный, причем его форма приблизительно отражает форму тела лейкогранитов в плане: короткая ось эллипсоида перпендикулярна его контактам, длинная ось круто (50°) падает по простиранию тела (рис. 4).

Результаты исследований и их обсуждение.

Основной вклад в магнитную восприимчивость пород во всех образцах вносят ферромагнитные (в широком смысле) минералы. Главную роль среди ферромагнетиков играет мелкозернистый ферромагнитный магнетит, для которого характерна анизотропия формы. Основной носитель остаточной намагниченности в породах Неплюевского массива, вероятно, также представлен магнетитом.

Следует ожидать, что для Неплюевского массива, как и для абсолютного большинства гранитоидных интрузивов, характерна исходно анизотропная магнитная текстура, создаваемая закономерной ориен-

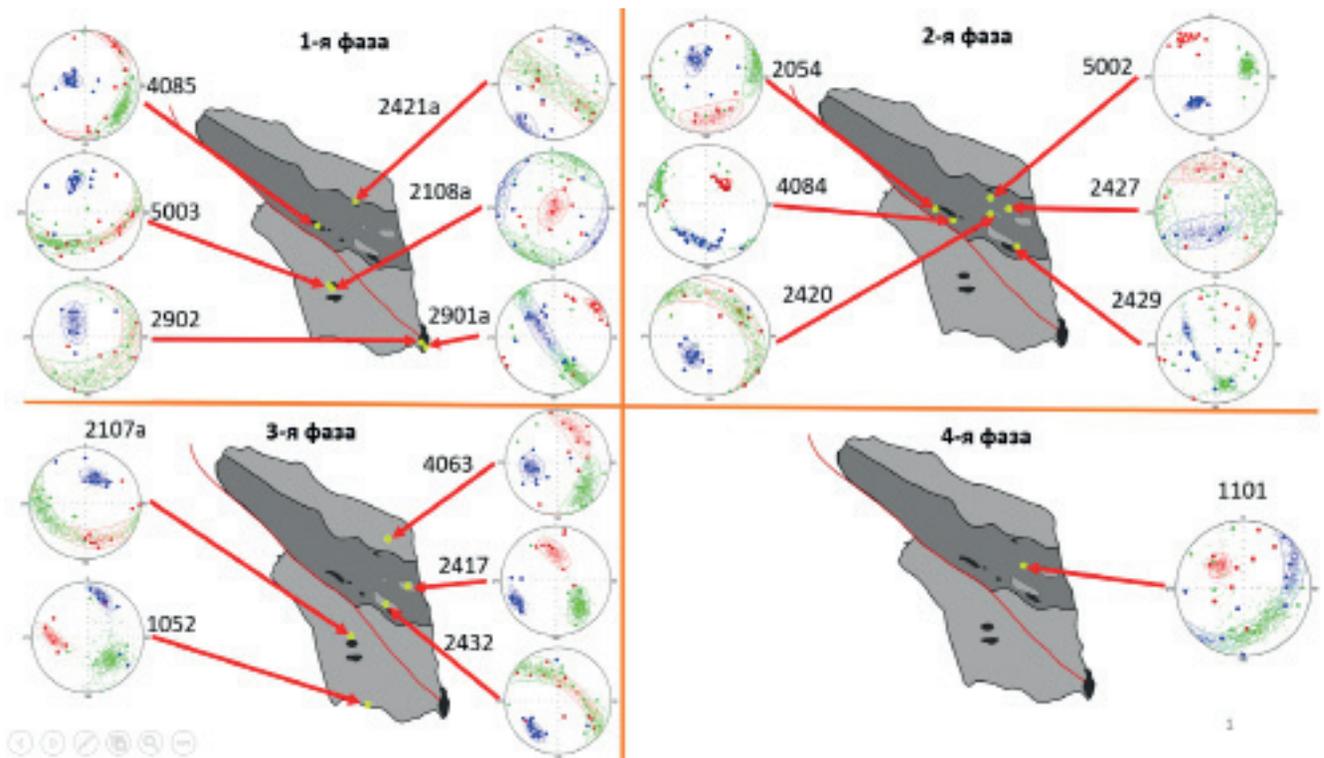


Рис. 4. Стереограммы для главных осей эллипсоидов магнитной восприимчивости пород Неплюевского массива. Залитые красные символы — направления осей K_{max} , зеленые — K_{int} , синие — K_{min} ; открытые символы соответствующего цвета — средние направления главных осей для сайта; цветные контуры — доверительные интервалы; цифры — номера сайтов (точек отбора). Выборки дополнены образцами, смоделированными методом Монте-Карло [Kulesa et al., 2015] (мелкие цветные точки)

тировкой длинной и короткой осей зерен магнетита в пространстве. При преобладании влияния МД магнетита можно ожидать, что длинные оси эллипсоидов анизотропии магнитной восприимчивости соответствуют длинным осям зерен магнетита, а короткие оси эллипсоидов — коротким осям зерен. Таким образом, мы ожидаем увидеть один из двух вариантов картины анизотропии магнитной восприимчивости в зависимости от происхождения наблюдаемой магнитной текстуры породы [Bouchez, 1997]:

1) в случае магматического происхождения без значительного влияния деформаций — сигарообразная форма двухосных эллипсоидов анизотропии магнитной восприимчивости ($K_{max} > K_{int} = K_{min}$), при этом длинные оси эллипсоидов анизотропии будут соответствовать длинным осям кристаллов магнетита и маркировать магматическую линейность;

2) в случае существенных деформаций — трехосная, удлинённая форма эллипсоидов ($K_{max} > K_{int} > K_{min}$), где длинная ось эллипсоида магнитной восприимчивости соответствует длинной оси кристалла и маркирует деформированную магматическую линейность, а короткая ось эллипсоида соответствует короткой оси деформированного кристалла и отмечает направление оси сжатия при деформации.

Реально наблюдаемая магнитная текстура существенно отличается от той, которую можно было бы ожидать по результатам анализа магнитной минералогии и параметров гистерезиса

ферромагнетиков. Основная предсказанная форма эллипсоидов магнитной анизотропии — двуосная сигароподобная ($K_{max} > K_{int} = K_{min}$), соответствующая преобладанию многодоменных зерен магнетита, в то время как реально наблюдаемая форма в большинстве случаев — дискообразная двухосная ($K_{max} = K_{int} > K_{min}$). Рассмотрим возможные причины этого несоответствия:

1) первичная магматическая текстура соответствовала ожидаемым характеристикам, но последующая деформация вызвала уплощение зерен и концентрацию коротких осей зерен магнетита по направлению сжатия. Такая форма может быть достигнута при деформации изначально изотропной породы, но полностью изотропные гранитоидные массивы на практике не встречаются [Bouchez, 1997]. Сжатие материала, характеризующегося сигарообразной формой эллипсоида AMS, может привести к переходу к дискообразной форме только в случае, если сжатие ориентировано строго соосно длинной оси эллипсоида, но в случае Неплюевского массива короткие оси эллипсоидов ориентированы весьма разнообразно и часто падают круто, поэтому сложно представить себе геологическую и механическую обстановку, в которой мог бы быть реализован такой механизм;

2) длинные оси отдельных многодоменных зерен ориентированы хаотично, а короткие оси концентрируются перпендикулярно поверхностям, вдоль которых растекается расплав. Это предположение

следует признать неверным, так как в случае исходно сигароподобных эллипсоидов AMS $K_{int} = K_{min}$ и при любой ориентировке зерен доверительные интервалы $a=95$ для усредненных направлений минимальной и средней осей должны существенно перекрываться, однако на деле мы наблюдаем существенное перекрытие доверительных интервалов для положения осей K_{max} и K_{int} и обособление области $a=95$ для K_{min} ;

3) наблюдаемая форма эллипсоидов анизотропии AMS соответствует форме, характерной для ОД зерен магнетита: $K_{max} = K_{int} > K_{min}$, т. е. обращенной магнитной текстуре [Rochette et al., 1992; Cerny et al., 2020], короткая ось эллипсоида AMS соответствует длинной оси зерна и маркирует направление течения расплава. В таком случае возникает несоответствие с результатами анализов параметров гистерезиса образцов. Его можно разрешить, если предположить сосуществование в породах двух популяций зерен магнетита: преобладающей, состоящих из хаотично ориентированных многодоменных зерен, вносящих вклад в общую магнитную восприимчивость и намагниченность, но дающих изотропную картину распределения этих характеристик, и второстепенной — состоящей из закономерно ориентированных однодоменных зерен, ответственных за девиаторную компоненту тензора магнитной восприимчивости. Третья гипотеза представляется наиболее правдоподобной — ОД зерна в таком случае связаны с исходной текстурой породы, а МД зерна могут быть продуктом позднего метасоматического преобразования. В дальнейшем при интерпретации мы будем опираться на третью гипотезу.

Рассмотрим возможные пути формирования наблюдаемой картины анизотропии магнитной восприимчивости.

Картина анизотропии магнитной восприимчивости гранитоидных массивов определяется двумя основными факторами: прототектоникой жидкой фазы и последующими тектоническими деформациями. Прогрессивная деформация на фоне метасоматической переработки массива способна полностью стирать исходную магматическую текстуру [Mamtani et al., 2013]. Магнитная анизотропия гранитоидов, формирующихся в высокострессовых обстановках, таким образом, отражает кинематический режим, в котором происходила их деформация.

В недеформированных гранитоидах данные об ориентировке зерен магнитных минералов могут быть интерпретированы так же, как и любая другая ориентированная магматическая текстура, несущая информацию о направлениях течения расплава. Следует полагать, что для большинства массивов вклад в конечный облик распределения анизотропии магнитной восприимчивости вносят и прототектонический, и тектонический факторы. Микро- и мезоструктуры, сопровождающие деформацию укорочения-удлинения в хрупком режиме величиной более 1%, в породах Неплюевского массива не описаны ни в одной работе.

Характер распределения направлений линейности также не свидетельствует о заметной деформации Неплюевского массива как единого блока — в случае значительного влияния такой прогрессивной деформации следовало бы ожидать концентрации этих направлений в компактной области. В силу этих соображений следует признать существенно магматическую природу магнитной текстуры Неплюевского массива.

Направления геологически значимых осей эллипсоидов AMS в пределах Неплюевского массива распределены закономерно (рис. 5).

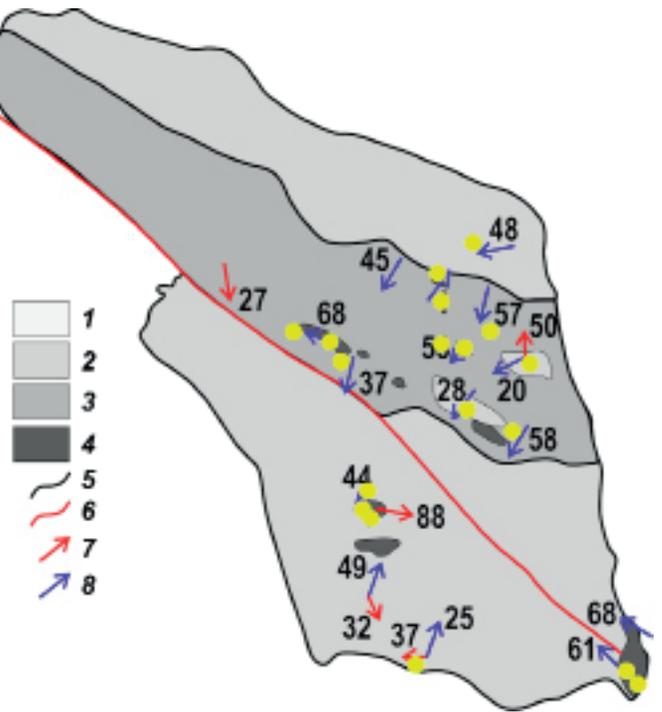
В габброидах 1-й фазы линейность круто ($44-88^\circ$) падает на северо-восток вне зависимости от положения конкретного сайта в пределах массива, кроме единственного сайта, на котором был опробован ксенолит габброидов (2421a). Это указывает на формирование тел габброидов, контролируемое единым крутопадающим подводющим каналом.

В теле гранодиоритов 2-й фазы, расположенном непосредственно на северо-востоке от Неплюевского разлома, линейность падает на юго-запад под углами $37-58^\circ$, субнормально к Неплюевскому разлому. Это свидетельствует о растекании расплава в северо-северо-восточном направлении от магмовода, связанного с Неплюевским сдвигом. Линейность ориентирована более полого, чем в случае габброидов 1-й фазы, что также соотносится с более удаленным от магмовода положением гранодиоритов. Длинные оси эллипсоидов анизотропии (K_{max}), соответствующие коротким осям зерен магнетита, ориентированы разнообразно, вблизи контактов тела гранодиоритов часто субперпендикулярно поверхности контакта. Вероятно, их ориентировки отражают распределение напряжений сжатия, возникших в ходе деформации массива

Ориентировка магматической линейности в адамеллитах (3-я фаза) отчетливо различается в частях массива, расположенных по разные стороны от Неплюевского сдвига. В северо-восточной части массива она падает на юго-запад и юго-юго-запад под углами $20-48^\circ$, в юго-западной — на северо-восток под углами $25-49^\circ$. Короткие оси зерен магнетита на сайтах, характеризующихся трехосной формой эллипсоида AMS, ориентированы субнормально к контактам. Распределение ориентировок линейности указывает на латеральное растекание расплава на северо-восток и юго-запад от центрального подводющего канала, сопряженного с Неплюевским сдвигом.

Единственного представительного сайта недостаточно, чтобы сделать достоверные выводы о механизме внедрения лейкогранитов. Их линейность ориентирована вдоль простираания малого тела и параллельно Неплюевскому разлому, плоскостная текстура параллельна контактам. Возможно, такая конфигурация эллипсоида AMS отражает деформации массива.

Рис. 5. Распределение геологически значимых главных осей эллипсоидов анизотропии магнитной восприимчивости в породах Неплюевского массива: 1 — плагиограниты 4-й фазы, 2 — адамеллиты 3-й фазы, 3 — гранодиориты 2-й фазы, 4 — габброиды 1-й фазы, 5 — геологические границы, 6 — Неплюевский разлом, 7 — оси K_{max} , 8 — оси K_{min}



Заключение. Изучение AMS пород Неплюевского массива после прогрева до 450 °С подтверждает выдвигающуюся ранее на основании геологических данных концепцию его образования по механизму сдвигового магматического дуплекса [Тевелев, 2012]. Фазы Неплюевского массива поэтапно пассивно внедрялись в развивающуюся в верхней коре структуру присдвигового растяжения в кинематической обстановке трансенсии. Магматический расплав поставляется центральным и единым для первых трех фаз подводным каналом, дренирующим нижнекоревый источник, состав расплава в котором эволюционирует по механизму кристаллизационного фракционирования, что приводит к подъему все более кислых магм и обуславливает гомодромную последовательность внедрения. На первом этапе происходило внедрение габброидов по серии субвертикальных трещин, имеющих северо-западное (в современных координатах) простирание. На втором этапе внедрялись гранодиориты вдоль северной субширотной границы, растущей в субмеридиональном направлении

трансенсивной структуры. На третьем этапе внедрялись адамеллиты вдоль северной и южной границ этой структуры в ходе ее дальнейшего роста. На четвертом этапе происходило внедрение лейкогранитов, генетическую связь которых с первыми тремя фазами массива затруднительно установить лишь на основании полученных данных. Схематично предлагаемый механизм внедрения Неплюевского массива изображен на рис. 6.

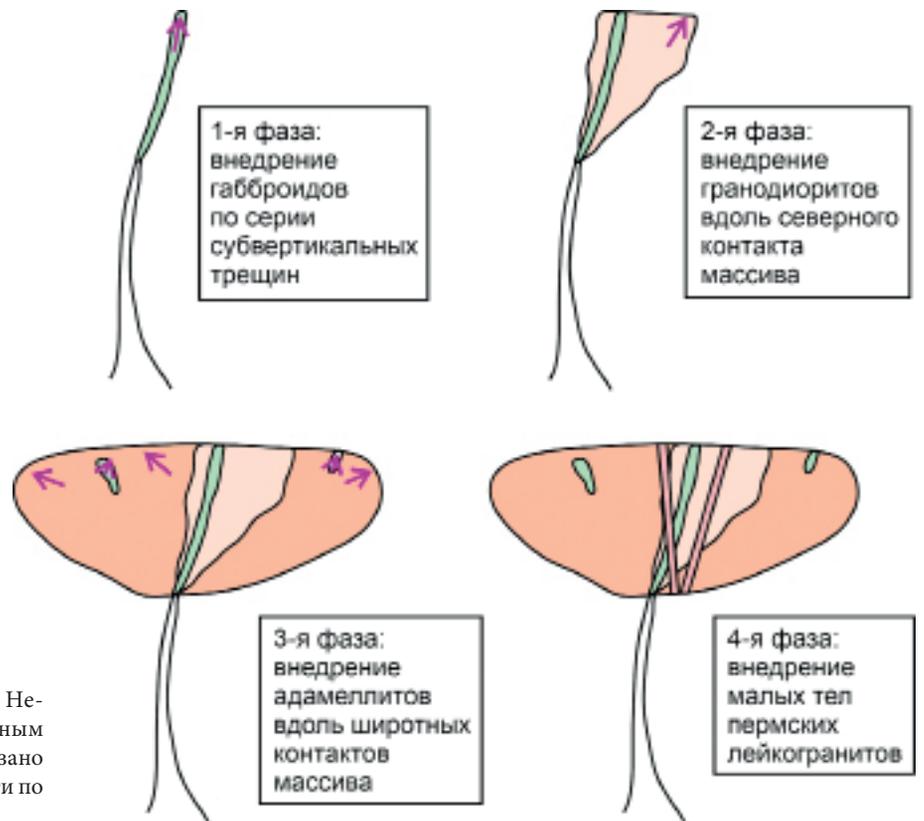


Рис. 6. Схема механизма внедрения Неплюевского массива по петромагнитным данным. Фиолетовыми стрелками показано направление магматической линейности по направлению движения магмы

Благодарности. Авторы благодарны руководству лаборатории палеоклиматологии, палеоэкологии и палеомагнетизма КФУ и лично Д.М. Кузиной за помощь в проведении магнитоминералогических исследований, а также А.А. Костерову (СПбГУ) и А.Ю. Гужикову (СГУ), благодаря замечаниям которых текст работы был значительно усовершенствован.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Буров Б.В., Ясонов П.Г. Введение в дифференциальный терромагнитный анализ горных пород. Казань: Изд-во КГУ, 1979. 159 с.

Карта дочетвертичных образований: N-40, (41) (Уфа). Государственная геологическая карта Российской Федерации и сопредельной территории республики Казахстан. Новая серия. Карта дочетвертичных образований, масштаб: 1:1 000 000, составлена: ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2001 г., редактор: В.И. Козлов URL: <https://www.geokniga.org/maps/387/> (даты обращения: май–июнь 2022).

Мосейчук В.М., Яркова А.В., Михайлов И.Г. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаб: 1:200 000. Сер. Южно-Уральская. Лист N-40-XXX. Объясн. зап. М.: МФ ВСЕГЕИ, 2013. 222 с.

Осипова Т.А., Вотьяков С.Л., Зайцева М.В. U–Pb-возраст и анализ Lu–Hf-изотопной системы циркона гранитоидов заключительных фаз Неплюевского плутона (Южный Урал) // Докл. РАН. 2018. Т. 481, № 5. С. 534–538.

Попов В.С., Тевелев Ал.В., Беляцкий Б.В. и др. Изотопный Rb–Sr-возраст Неплюевского плутона и близлежащих интрузивных тел (Южный Урал) // Докл. РАН. 2003. Т. 391, № 1. С. 89–94.

Пучков В.Н. Палеогеодинамика Южного и Среднего Урала. Уфа: ГИЛЕМ, 2000. 146 с.

Сначёв А.В., Сначёв В.И., Романовская М.А. История формирования раннекаменноугольной габбро-гранитной формации Южного и Среднего Урала // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2019. № 5. С. 10–18.

Тевелев Ал.В., Тевелев Арк.В., Кошелева И.А., Гроховская Т.Л. Динамика сдвиговых магматических дуплексов. М.: Российский фонд фундаментальных исследований, 1998. № 96-05-65519.

Тевелев А.В., Кошелева И.А., Буриштейн Е.Ф. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. 2-е изд. Сер. Южно-Уральская. Лист N-41-XXV (Карталы). Объясн. зап. М.: Московский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2018. 175 с.

Тевелев, А.В., Соболев, И.Д., Борисенко, А.А. и др. Начальный этап раннекаменноугольного рифтинга на Южном Урале: первые результаты U–Pb датирования циркона из гранитоидов неплюевского комплекса // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2022. № 6. С. 40–48.

Ферштатер Г.Б. Палеозойский интрузивный магматизм Среднего и Южного Урала. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2013. 368 с.

Benn K. Anisotropy of magnetic susceptibility fabrics in syntectonic plutons as tectonic strain markers: the example of the Canso pluton, Meguma Terrane, Nova Scotia // Earth and Environ. Sci. Transactions of the Royal Soc. of Edinburgh, 2010. Vol. 100. P. 147–158.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-55-26009 Чехия_а). В ходе работ использованы космоснимки, предоставленные ЦКП «Геопортал», а также микроскоп Olympus BX53P, приобретенный по программе развития МГУ.

Bouchez J.L. Granite is never isotropic: an introduction to AMS studies of granitic rocks // Granite: from segregation of melt to emplacement fabrics / Ed. by J.L. Bouchez, D.H.W. Hutton, W.E. Stephens. Kluwer, Dordrecht, 1997. P. 95–112.

Černý J., Melichar R., Všíanský D., Drahoušková J. Magnetic anisotropy of rocks: A new classification of inverse magnetic fabrics to help geological interpretations // J. Geophys. Res.: Solid Earth. 2020. Vol. 125, N 11. e2020JB020426.

Day R., Fuller M., Schmidt V.A. Hysteresis properties of titanomagnetites: grain-size and compositional dependence // Phys. Earth and Planet. Interiors. 1977. Vol. 13, N 4. P. 260–267.

Dunlop D.J. Theory and application of the Day plot (Mrs/Ms versus Hcr/Hc) 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data // J. Geophys. Res.: Solid Earth. 2002a. Vol. 107, N B3. DOI: 10.1029/2001JB000486.

Dunlop D.J. Theory and application of the Day plot (Mrs/Ms versus Hcr/Hc) 2. Application to data for rocks, sediments, and soils // J. Geophys. Res.: Solid Earth. 2002b. Vol. 107, N B3. DOI: 10.1029/2001JB000487.

Dunlop D.J., Carter-Stiglitz B. Day plots of mixtures of superparamagnetic, single-domain, pseudosingle-domain, and multidomain magnetites // J. Geophys. Res.: Solid Earth. 2006. T. 111. N B12. doi:10.1029/2006JB004499.

Dunlop D.J., Özdemir Ö. Rock magnetism: Fundamentals and Frontiers. N. Y.: Cambridge Univ. Press, 1997. 573 с.

Georgiev N., Henry B., Jordanova N. et al. Emplacement and fabric-forming conditions of plutons from structural and magnetic fabric analysis: A case study of the Plana pluton (Central Bulgaria) // Tectonophysics. 2014. Vol. 629. С. 138–154.

Kratinova Z., Shulmann K., Edel J.B., Shaltegger U. Multiple magmatic fabrics in episodically emplaced Granites in transtensional setting: tectonic model based on AMS study and numerical modeling // GeoLines. 2006. Vol. 20. P. 75–76.

Kulesa A., Krzywinski M., Blainey P., Altman N. Sampling distributions and the bootstrap // Nature Methods. 2015. Vol. 12, N 6. P. 477–8. DOI: 10.1038/nmeth.3414

Mamtani M.A., Pal T., Greiling R.O. Kinematic analysis using AMS data from a deformed granitoid // J. Structur. Geology. 2013. Vol. 50. P. 119–132.

Maxbauer D.P., Feinberg J.M., Fox D.L. MAX UnMix: A web application for unmixing magnetic coercivity distributions // Computers & Geosci. 2016. Vol. 95. P. 140–145.

Rochette P., Jackson M., Aubourg C. Rock magnetism and the interpretation of anisotropy of magnetic susceptibility // Rev. Geophys. 1992. Vol. 30. P. 209–226.

Silva O.B., Raposo M.I.B. Emplacement of the Anta Granite from Rio de Janeiro State (SE, Brazil); determined by magnetic fabrics // Brazilian J. Geology. 2020. Vol. 50.

Tarling D., Hrouda F. (ed.). *Magnetic anisotropy of rocks* / Ed. by D. Tarling, F. Hrouda. London; New York: Chapman & Hall, 1993. 217 p.

Thébault E., Finlay C.C., Beggan C.D. et al. International geomagnetic reference field: the 12th generation // *Earth, Planets and Space*. 2015. Vol. 67.

Tomek F., Žák J., Chadima M. Magma flow paths and strain patterns in magma chambers growing by floor subsid-

ence: a model based on magnetic fabric study of shallow-level plutons in the Štiavnica volcano–plutonic complex, Western Carpathians // *Bull. Volcanol.* 2014. Vol. 76.

Žák J., Verner K., Holub F.V. et al. Magmatic to solid state fabrics in syntectonic granitoids recording early Carboniferous orogenic collapse in the Bohemian Massif // *J. Structur. Geology*. 2012. Vol. 36. P. 27–42.

Статья поступила в редакцию 01.12.2022,
одобрена после рецензирования 12.12.2022,
принята к публикации 12.03.2022