



GEOLOGICAL SETTING AND GENESIS OF THE KURMANSKY GABBRO-TRONDHJEMITE MASSIF (MIDDLE URALS)

S.V. Pribavkin , A.V. Korovko , M.D. Vishniakova 

Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 15 Academician Vonsovsky St, Ekaterinburg 620016, Russia

ABSTRACT. This paper reports the results of petrogeochemical studies of the Kurmansky gabbro-trondhjemite massif (eastern slope of the Middle Urals), lying in the western part of the large Reftinsky allochthonous block within the accretion East Uralian megazone. The relevance of this study is determined by the uncertainty in geodynamic setting and formation conditions of the rock massif and its role in the evolution of the Ural Mobile belt. We specified the contours of the massif. It is shown that the rocks were resulted from spatiotemporal convergence of partial melting in the mantle and lower crust at the island-arc stage of the Ural Mobile belt evolution. Partial melting of mantle peridotite, under the influence of an aqueous fluid rising from the subduction zone, initiated the occurrence of basite melts. The separation of the melt and its subsequent evolution to the compositions of gabbrodiorite and diorite took place at $P_{\text{tot}}=10$ kbar. Trondhjemites were formed as a result of partial melting of amphibolites at $P_{\text{tot}} \geq 8$ kbar, $P_{\text{H}_2\text{O}}=0.1-0.2$ kbars. The crystallization of trondhjemites in the crust was accompanied by the wollastonite skarns on contact with carbonate rock and xenoliths culminated at mesoabyssal level, $P_{\text{tot}}=P_{\text{H}_2\text{O}}=1$ kbar. The comparison between the composition of Kurmansky gabbro-trondhjemite massif and the island-arc- and collision-related magmatic suites in the region allowed us to assume that the Kurmansky massif belongs to the independent Early Devonian (?) gabbro-trondhjemite complex of island arc origin. The rock metamorphism conditions were evaluated, with the transformations supposedly related to the accretion of early island arc complexes at the Murzinsky-Aduysky microcontinent, which took place in the Devonian.

KEYWORDS: petrology; geochemistry; gabbro; trondhjemites; Kurmansky massif; Reftinsky allochthon; Middle Urals

FUNDING: The work is done under the government contract of IGG UB RAS, theme AAAA-A18-118052590029-6, with the equipment of Shared Research Facilities "Geoanalytic" in IGG UB RAS. The modernization and integrated development of Shared Research Facilities "Geoanalytic" in IGG UB RAS is provided with financial support of the grant of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Agreement 075-15-2021-680.

RESEARCH ARTICLE

Received: December 25, 2020

Revised: July 8, 2021

Accepted: July 12, 2021

Correspondence: Sergey V. Pribavkin, pribavkins@gmail.com

English version: see article page online

FOR CITATION: Pribavkin S.V., Korovko A.V., Vishniakova M.D., 2022. Geological setting and genesis of the Kurmansky gabbro-trondhjemite massif (Middle Urals). *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (1), 0573. doi:10.5800/GT-2022-13-1-0573

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ И ГЕНЕЗИС КУРМАНСКОГО ГАББРО-ТРОНДЬЕМИТОВОГО МАССИВА (СРЕДНИЙ УРАЛ)

С.В. Прибавкин, А.В. Коровко, М.Д. Вишнякова

Институт геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого УрО РАН, 620016, Екатеринбург, ул. Академика Вонсовского, 15, Россия

АННОТАЦИЯ. В статье представлены результаты петрогеохимических исследований пород Курманского габбро-трондьемитового массива (восточный склон Среднего Урала), залегающего в западной части крупного Рефтинского аллохтонного блока, локализованного в пределах Восточно-Уральской мегазоны аккреционной природы. Актуальность исследований заключается в установлении геодинамических режимов формирования пород, их позиции в эволюции Уральского подвижного пояса. В ходе исследования уточнены контуры массива. Показано, что данные породы образовались в результате сближенных по времени и в пространстве процессов частичного плавления в мантии и нижней коре на островодужном этапе развития Уральского подвижного пояса. Частичное плавление мантийного перидотита под воздействием восходящего из зоны субдукции водного флюида привело к зарождению базитового расплава. Отделение расплава и его последующая эволюция до составов габбро-диорита, диорита происходили при $P_{\text{общ}} = 10$ кбар. Трондьемиты, ассоциированные с габброидами, были получены в результате частичного плавления амфиболитов при $P_{\text{общ}} \geq 8$ кбар, $P_{\text{H}_2\text{O}} = 0.1-0.2 P_{\text{общ}}$. Их становление в коре сопровождалось развитием волластонитовых скарнов на контактах с ксенолитами карбонатных пород и завершилось в мезоабиссальной обстановке при $P_{\text{общ}} = P_{\text{H}_2\text{O}} = 1$ кбар. Выполнено сопоставление состава слагающих массив пород с развитыми в районе магматическими образованиями островодужной и коллизионной стадий, что позволило высказать предположение о принадлежности Курманского массива к самостоятельному раннедевонскому (?) габбро-трондьемитовому комплексу островодужной природы. Охарактеризованы условия метаморфизма пород массива, высказано предположение о связи этих преобразований с аккрецией раннеостроводужных комплексов на Мурзинско-Адуйский микроконтинент, имеющей место в девоне.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: петрология; геохимия; габбро; трондьемиты; Курманский массив; Рефтинский аллохтон; Средний Урал

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена в рамках государственного задания ИГГ УрО РАН, тема № АААА-А18-118052590029-6 с использованием оборудования ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН. Дооснащение и комплексное развитие ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН осуществляется при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение № 075-15-2021-680.

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема взаимоотношений интенсивно тектонизированных образований палеозоя и высокометаморфизованных докембрийских комплексов является одной из ключевых в понимании геологической истории развития Уральского подвижного пояса. На восточном склоне Среднего Урала позднепротерозойские метаморфические породы Мурзинско-Адуйского террейна (фрагмент доуральского микроконтинента) контактируют с вулканогенными и осадочными комплексами раннего палеозоя (рис. 1). Время и характер этого контакта не ясны, поскольку в позднем палеозое коллизионные процессы привели к формированию шовной зоны и мощной зоны смятия, сопровождаемой развитием шарьяжей и аллохтонов, к широкому распространению коллизионного гранитного магматизма (Мурзинский, Адуйский, Каменский межформационные массивы), поглотившего зону сочленения. В этой связи изучение рефтинского аллохтонного блока, полого перекрывающего зону смятия и сложенного преимущественно раннепалеозойскими магматическими комплексами, времени и характера их метаморфизма в зоне

сочленения с террейном позволяет наметить пути решения указанной проблемы.

Рефтинский аллохтонный блок является одним из наиболее крупных на Урале (рис. 1). В его западной части, контактирующей с телами межформационных гранитов, помимо габбро, диоритов, тоналитов, плагиогранитов одноименного рефтинского комплекса, выделяются породы алапаевского дунит-гарцбургит-габбрового комплекса и гранитоиды аверинского комплекса [State Geological Map..., 2015, 2017]. Здесь же присутствуют габбро, габбро-диориты, трондьемиты небольшого Курманского массива. Последние, в связи с отсутствием надежных петрогеохимических и геохронологических данных, в разных объемах то относили к образованиям рефтинского габбро-диорит-тоналит-плагиогранитного комплекса [State Geological Map..., 1987] или аверинского диорит-трондьемитового комплекса [Rapoport, Medyakov, 1974] силурийско-раннедевонской островной дуги, то условно включали в состав коллизионного каменского гранодиорит-гранитного комплекса, «сшивающего» тектонические пластины аллохтонного блока [State Geological Map..., 2017; и др.].

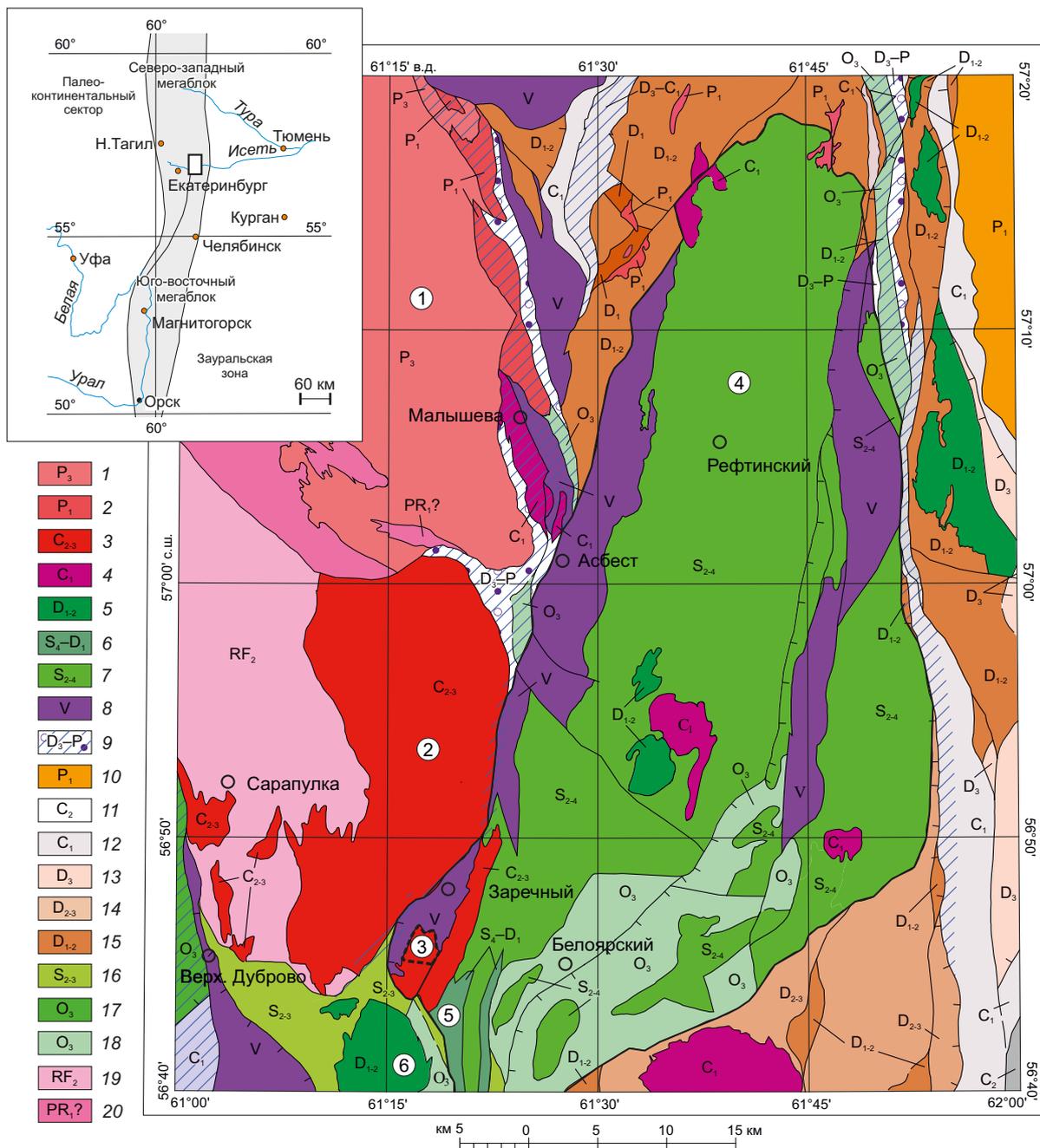


Рис. 1. Геологическое строение района Курманского массива (генерализованный фрагмент геологической карты образований листа O-41-XXVI (Асбест), масштаб 1:200000 [State Geological Map., 2017]).

Магматические комплексы: 1 – граниты биотитовые и двуслюдяные адуйского комплекса (P₃); 2 – граниты биотитовые, лейкограниты петуховского комплекса (P₁); 3 – гранодиориты, граниты каменского комплекса (C₂₋₃); 4 – габбро, гранодиориты, граниты некрасовского комплекса (C₁); 5 – диориты, плагиограниты алтынайского комплекса (D₁₋₂); 6 – трондьемиты аверинского комплекса (S_{4-D₁}); 7 – габбро, диориты, тоналиты, плагиограниты рефтинского комплекса (S₂₋₄); 8 – габбро, нерасчлененные ультрамафиты алапаевского комплекса (V); 9 – полимиктовый меланж Восточно-Уральского тектоногенного комплекса (D_{3-P}). Вулканогенные, вулканогенно-осадочные и осадочные комплексы: 10 – опоки, песчаники серовской свиты (P₁); 11 – аргиллиты, алевролиты, песчаники, конгломераты щербаковской свиты (C₂); 12 – граувакковые и олигомиктовые песчаники, алевролиты, часто углеродистые, сланцы кремнистые, углеродисто-кремнистые арамилской свиты (C₁); 13 – известняки устькодинской свиты (D₃); 14 – базальты, андезитобазальты с прослоями туфитов, глинисто-кремнистых пород и кремнистых пород маминской толщи (D₂₋₃); 15 – субвулканические риолиты рудянского комплекса (D₁₋₂); 16 – кремнистые, углеродисто-кремнистые сланцы, кварциты, линзы мраморов колюткинской свиты (S₂₋₃); 17 – metabазальты, метатуфопесчаники, кремнистые туфиты, углеродисто-кварцевые породы новоберезовской толщи (O₃); 18 – metabазальты, углеродисто-кварцевые сланцы белоярской толщи (O₃); 19 – кристаллосланцы биотит-(мусковит)-плагиоклаз-кварцевые, кварц-амфибол-биотит-плагиоклазовые, (биотит)-амфибол-кварц-плагиоклазовые графитсодержащие, кварциты слюдистые, кальцифиры, плагионейсы алабашской серии (RF₂); 20 – плагионейсы биотитовые, биотит-амфиболовые, амфибол-биотитовые с горизонтами амфиболитов, гранитогнейсов (PR_{1?}).

Цифры в кружках – интрузивные массивы: 1 – Адуйский, 2 – Каменский, 3 – Курманский, 4 – Рефтинский, 5 – Аверинский, 6 – Бруснянский. Толстой сплошной линией показан контур рефтинского аллохтона. Толстой пунктирной линией показан контур Курманского массива по результатам наших исследований.

Fig. 1. Geological structure of the Kurmansky massif area (generalized part of the geological map 1: 200 000, O-41-XXVI (Asbest) (after [State Geological Map..., 2017]).

Magmatic complexes: 1 – biotite and two-micas granites of the Aduysky complex (P_3); 2 – biotite granites, leucogranites of the Petukhovskiy complex (P_1); 3 – granodiorites, granites of the Kamensky complex (C_{2-3}); 4 – gabbro, granodiorites, granites of the Nekrasovskiy complex (C_1); 5 – diorites, plagiogranites of the Altay complex (D_{1-2}); 6 – trondjemites of the Averinsky complex (S_4-D_1); 7 – gabbro, diorites, tonalites, plagiogranites of the Reftinsky complex (S_{2-4}); 8 – gabbro, undifferentiated ultramafites of the Alapaevskiy complex (V); 9 – polycomponent melange of the East Uralian tectonogenic complex (D_3-P). Volcanics and volcano-sedimentary and sedimentary complexes: 10 – flasks, sandstones of the Serovskiy Suite (P_1); 11 – mudstones, siltstones, sandstones, conglomerates of the Scherbakovskiy Suite (C_2); 12 – oligomictic and greywacke sandstones, siltstones, often carbonaceous, siliceous, carbon-siliceous shales of the Aramiskiy Suite (S_1); 13 – limestones of the Ustinovskiy Suite (D_3); 14 – basalts, andesite-basalts with layers of tuffites, clay-siliceous and siliceous rocks of the Maminskoy Formatsiya (D_{2-3}); 15 – subvolcanic rhyolites of the Rudyanskoy complex (D_{1-2}); 16 – siliceous, carbonaceous-siliceous shales, quartzites, lenses of marbles of the Kolodinskoy Suite (S_{2-3}); 17 – metabasalts, metatufosandstones, siliceous tuffites, carbon-quartz rocks of the Novoberezhovskoy Formatsiya (O_3); 18 – metabasalts, carbon-quartz shales of the Beloyarskoy Formatsiya (O_3); 19 – biotite-(Muscovite) – plagioclase-quartz, quartz-amphibole-biotite-plagioclase, (biotite)- amphibole-quartz-plagioclase graphite-containing schists, micaceous quartzites, calcifiers, plagiogneisses of the Alabashka suite (RF_2); 20 – of biotite, biotite-amphibole, amphibole-biotite plagiogneisses with layers of amphibolites, granitogneisses (PR_1 ?).

Figures in circles mean intrusive massifs: 1 – Aduysky, 2 – Kamensky, 3 – Kurmansky, 4 – Reftinsky, 5 – Averinsky, 6 – Brusyansky. A thick solid line shows the contour of the Reftinsky allochthon. Thick dotted line shows the contour of the Kurmansky massif in accordance to the results of our research.

В решение вопросов формационной и возрастной принадлежности пород Курманского массива значительный вклад внесли работы Г.Б. Ферштатера. В 2013–2015 гг. вышел ряд публикаций, включая монографию «Палеозойский интрузивный магматизм Среднего и Южного Урала» [Fershtater, 2013, 2015], в которых приведены определения абсолютного возраста пород Курманского массива по цирконам (U-Pb метод), составившие 411 ± 2 (SHRIMP-II), 397 ± 2 (LA-ICP-MS) млн лет для мигматизированных амфиболовых габбро и 405 ± 4 (SHRIMP-II) млн лет – для трондьемитов. Эти датировки свидетельствовали о несостоятельности отнесения образований Курманского массива ни к рефтинскому (435–430 млн лет) или аверинскому (420–419 млн лет) комплексу, ни тем более к позднекаменноугольному каменному комплексу с возрастом 309–298 млн лет, как это принято в легенде к геологической карте [State Geological Map..., 2017].

Помимо возрастных исследований, Г.Б. Ферштатером с соавторами особое внимание было уделено структурным и вещественным особенностям пород массива. Показано, что наличие межзернового мелкозернистого кварц-полевошпатового агрегата является их важнейшей петрографической чертой, свидетельствующей о проявлении процессов мигматизации. Это позволило проецировать гипотезу самопроизвольной мигматизации водных расплавов габбро в процессе их продвижения к земной поверхности [Fershtater, 2013, 2015; Fershtater et al., 2018; Zamyatina, Borodina, 2015] на генезис пород Курманского массива. Условия мигматизации этими авторами были оценены в 8 кбар.

В настоящей работе изложены результаты минералогических, петролого-геохимических исследований пород Курманского массива на основе авторских данных и данных предшественников, приблизившие нас к пониманию генезиса, формационной принадлежности

пород массива и некоторых аспектов геологического строения и истории развития района, включая время аккреции раннеостроводужных палеозойских комплексов с породами Мурзинско-Адуйского террейна.

2. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ И СТРОЕНИЕ КУРМАНСКОГО МАССИВА

Курманский габбро-трондьемитовый массив располагается в 40 км к востоку от Екатеринбурга, среди интенсивно тектонизированных структур Восточно-Уральской мегазоны, представляющей собой сложно построенный аккреционный мегаблок [Puchkov, 2000]. Массив находится в краевой западной части рефтинского аллохтонного блока среди тектонических пластин крутого восточного падения, надвинутых на Мурзинско-Адуйский метаморфический блок (террейн или фрагмент докембрийского микроконтинента) и рассеянных в зоне сочленения Баженовской шовной зоной [Smirnov et al., 2019], «запечатанной» позднепалеозойскими гранитными массивами (рис. 1).

По результатам выполненной нами комплексной интерпретации ранее и вновь полученной информации Курманский массив имеет близкую к субизометричную форму размером 3.5×2.0 км (рис. 1), более компактную, чем предполагалось ранее [State Geological Map..., 2017]. Массив сложен габбро, габбро-диоритами первой фазы и трондьемитами второй фазы с преобладанием последних. Породы массива имеют тектонические контакты с вмещающими интрузивными и вулканогенными породами, и лишь на северо-западе отмечаются их интрузивные контакты с габбро алапаевского комплекса [State Geological Map..., 2017], залегающими в основании аллохтонного блока. Все породы массива и ближайшего окружения испытали метаморфизм эпидот-амфиболитовой фации, который привел к развитию амфиболитов, метагаббро, метатрондьемитов.

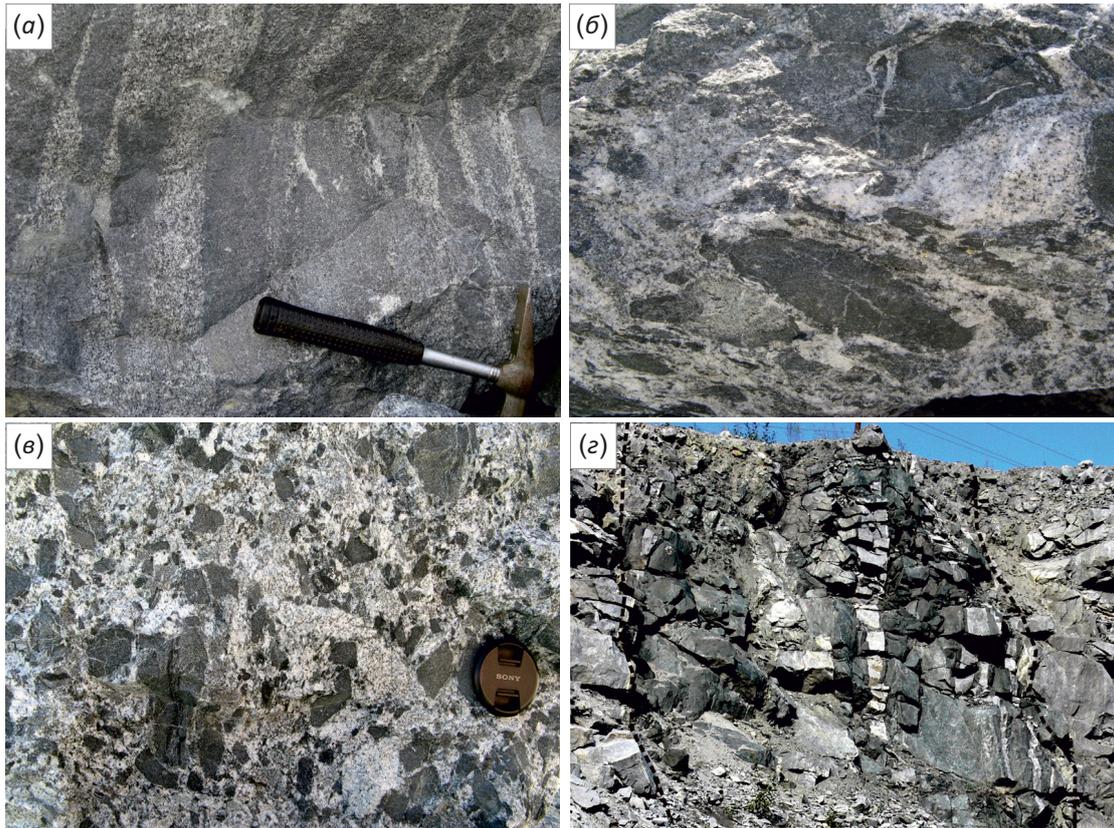


Рис. 2. Взаимоотношения пород и их геологические особенности. (а, б) – мигматитоподобные текстуры в блоках габбро-диоритов; (в) – эруптивные брекчии габбро-диоритов; (з) – дайка микрогаббро-диоритов с обособлениями жильных трондьемитов (фото Г.Б. Ферштатера).

Fig. 2. Relationships of rocks and their geological features. (а, б) – migmatite-like textures in blocks of gabbrodiorites; (в) – eruptive breccias of gabbrodiorites; (з) – dike of microgabbrodiorites with separations of trondhjemite veins (photo by G.B. Fershtater).

Метаморфические преобразования отразились на развитии амфибола, биотита, эпидота, тонкозернистого гранобластового агрегата плагиоклаза, кварца [Eselevich, Sergievskaya, 1953; Rapoport, Medyakov, 1974]. Несмотря на факт метаморфизма, далее мы будем именовать породы в соответствии с их первичной природой, как это имеет место в объяснительных записках к геологическим картам района [Rapoport, Medyakov, 1974; State Geological Map..., 1987, 2017].

Фрагмент северной части массива вскрыт Курманским щебеночным карьером, в котором наблюдаются интрузивные контакты трондьемитов с габбро, габбро-диоритами, диоритами. Последние в зоне контакта слагают крупные (в десятки метров) ксенолиты, рассеченные маломощными жилами трондьемитов (рис. 2, а, б), описанные в работах [Fershtater, 2013, 2015; Fershtater et al., 2018; Zamyatina, Borodina, 2015] в качестве мигматитов, или слагают обломки в составе эруптивных брекчий (рис. 2, в). Иногда трондьемиты содержат редкие ксенолиты метавулканитов, известковых пород, превращенных в пироксен-гранат-волластонитовые, гранат-эпидотовые и эпидот-кварц-плагиоклазовые скарны [Eselevich, Sergievskaya, 1953; Rapoport, Medyakov, 1974; Pribavkin et al., 2014]. Все породы массива

прорваны дайками микрогаббро-диоритов, микродиоритов с жильными обособлениями лейкократового материала (рис. 2, г).

3. ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОРОД

Макроскопически габбро, габбро-диориты, диориты представляют собой разномасштабные породы, в которых полевой шпат и амфибол находятся примерно в равных соотношениях: плагиоклаз 30–40 %, амфибол 35–50 %; присутствуют также кварц – 5–10 %, эпидот и биотит – 2–10 %. В породах сохраняются реликты исходной габбровой и диоритовой структуры, реже порфировидной с преобладанием более крупного и идиоморфного амфибола над плагиоклазом. Реликтовый плагиоклаз крупных субидиоморфных таблиц варьируется по составу от An_{42} до An_{30} и содержит включения эпидота. С краев и по трещинам он подвержен перекристаллизации с образованием мелко- и микромасштабного гранобластового агрегата новообразованного плагиоклаза состава An_{20-24} . Количество последнего варьируется от первых процентов (рис. 3, а) до десятков процентов, вплоть до полной перекристаллизации первичного плагиоклаза (рис. 3, б). Синезеленый амфибол наравне с мелкими длиннопризматическими

зернами образует широкие таблицы (по пироксену?) с извилистыми или занозистыми границами. Биотит ассоциирован с мелкозернистым полевошпатовым агрегатом, что свидетельствует о его развитии в связи с перекристаллизацией.

Микрогаббро-диориты, микродиориты даек характеризуются мелкозернистой нематогранобластовой структурой (рис. 3, в). Ориентировка призм амфибола неупорядочена или субпараллельна контактам даек. Минеральный состав аналогичен вышеописанным габбро-диоритам, отличие заключается в отсутствии плагиоклаза выше An_{25} .

Тронджемиты – плотные, мелкозернистые породы, содержащие большое количество ксенолитов. Они обладают ориентированной в северо-западном направлении гнейсовидной текстурой, в этом же направлении

ориентированы и многочисленные ксенолиты. Преобладающие в массиве тронджемиты содержат 30–40 % плагиоклаза, 25–35 % кварца, 5–10 % биотита, 0–5 % амфибола и характеризуются малым количеством или почти полным отсутствием микроклина. Под микроскопом в них наблюдается первичная магматическая среднезернистая структура, затухевшая, как и в габброидах, развитием новообразованного микро- и мелкозернистого гранобластового кварц-полевошпатового агрегата. Объем последнего варьируется от первых процентов, когда единичные зерна формируют «цепочки бус» (рис. 3, г), до десятков процентов, когда в породе сохраняются лишь отдельные реликты первичного плагиоклаза (рис. 3, д, е). Первичный плагиоклаз соответствует An_{24-25} , новообразованный близок к нему по составу – An_{20-24} . Калиевый полевой шпат

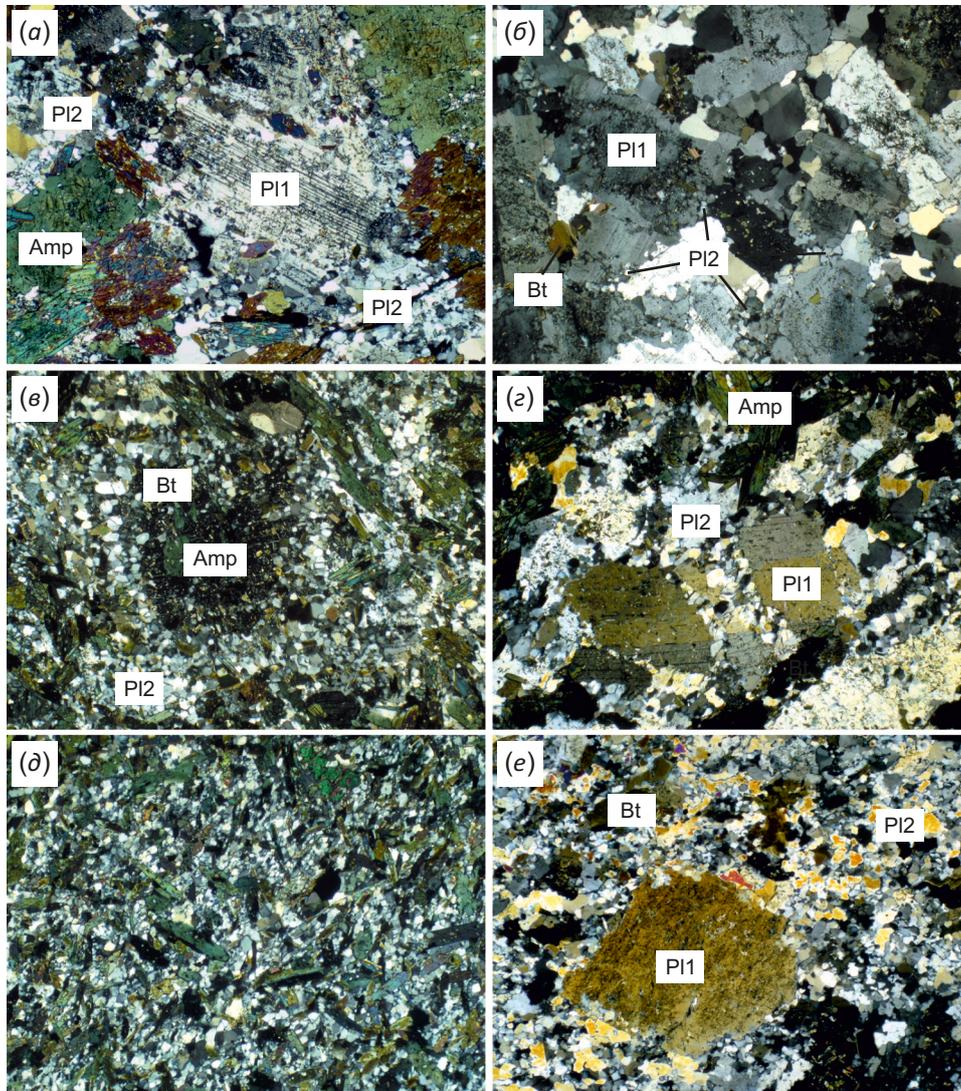


Рис. 3. Микрофотографии структур пород габбро (а, б), микрогаббро-диорита (в), тронджемита (г, д, е). Длина фотографии – 10 мм. Николи скрещены. P1 и P2 – реликтовый и новообразованный плагиоклаз. Amp – амфибол, Bt – биотит. Пояснения в тексте.

Fig. 3. Micro-images of rock structures: gabbro (a, b), microgabbro-diorite (c), trondhjemite (d, e). The length of the photo is 10 mm. Nicolies crossed. P1 and P2 – relict and newly formed plagioclase. Amp – amphibole, Bt – biotite. For explanations see the text.

находится только в составе новообразованного агрегата в резко подчиненном количестве по отношению к плагиоклазу. Биотит представлен мелкими табличками, образующими кучные скопления. Амфибол присутствует вблизи контактов с габброидами, образует вытянутые призматические зерна, окрашенные в сине-зеленый цвет.

Жильные разности трондьемитов развиты среди блоков и даек габброидов, что придает им мигматитоподобный облик. Они отличаются от трондьемитов главной фазы частым наличием амфибола и меньшим количеством кварца. Постепенное возрастание количества темноцветов к контакту с габброидами указывает на явление контаминации трондьемитов с развитием гибридных пород, соответствующих по составу тоналитам или кварцевым диоритам.

Акцессорные минералы во всех типах пород представлены апатитом, ильменит-гематитовым твердым раствором, магнетитом, сульфидами, цирконом, титанитом. Главный вторичный минерал – эпидот.

Важной петрографической особенностью пород массива, отмечаемой еще по результатам геологических съемок [Eselevich, Sergievskaya, 1953; Rapoport, Medyakov, 1974], является наличие межзернового мелкозернистого кварц-полевошпатового агрегата микрогранобластовой структуры, интерпретируемого как результат перекристаллизации. Связь такого агрегата с процессом мигматизации, при котором анатектический

расплав сохранялся *in situ*, особо подчеркивалась в работах [Fershtater, 2013; Zamyatina, Borodina, 2015].

4. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование химического состава минералов и горных пород выполнено в Центре коллективного пользования «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН. Состав минералов определен на рентгеновском микроанализаторе Самеса SX-100 при ускоряющем напряжении 15 кВ и токе электронного зонда 40 нА.

Химический состав пород определен рентгеноспектральным флуоресцентным методом на CPM-35 и XRF 1800. FeO определено методом титрования, потери при прокаливании – гравиметрическим методом. Рассеянные, редкие и редкоземельные элементы в породах определены на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой ELAN 9000.

В процессе работ использованы данные о химическом составе пород Курманского массива, полученные в химико-аналитической лаборатории ЦЛ ПГО «Урал-геология» в разные годы [Rapoport, Medyakov, 1974; Kubashin, Lykova, 1985].

5. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

5.1. Особенности химического состава пород

На классификационной диаграмме сумма щелочей – кремнезем ксенолиты и дайки пород основного состава соответствуют габбро, габбро-диоритам, диоритам,

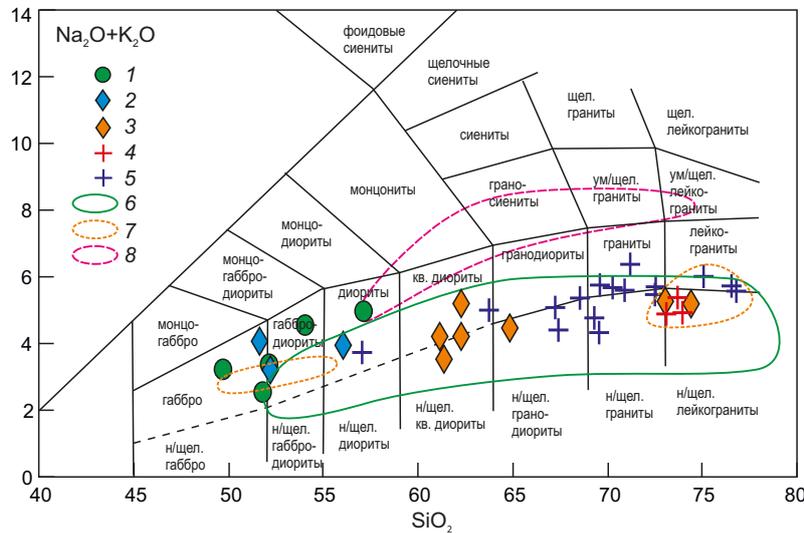


Рис. 4. Диаграмма (Na₂O+K₂O) – SiO₂ для пород Курманского массива в сопоставлении с магматическими комплексами района. 1 – габбро, габбро-диориты; 2 – дайки микрогаббро-диоритов; 3 – жильные трондьемиты; 4 – трондьемиты главной фазы Курманского массива; 5 – составы гранитоидов Курманского массива, согласно [Rapoport, Medyakov, 1974; Kubashin, Lykova, 1985]; 6–8 – поля составов: 6 – габбро, тоналитов, плагиогранитов рефтинского комплекса [Fershtater, 2013; Smirnov et al., 2018], 7 – габбро и трондьемитов аверинского комплекса [Lobova et al., 2012], 8 – гранодиоритов и гранитов каменского комплекса [Fershtater, 2013]. Точки составов пород на диаграмме рассчитаны на сухой остаток.

Fig. 4. Diagram (Na₂O+K₂O) – SiO₂ for the Kurmansky massif rocks and magmatic complexes of the region. 1 – gabbro, gabbro-diorites; 2 – microgabbro-diorite dykes; 3 – vein trondhjemites; 4 – trondhjemites of the main phase of the Kurmansky massif; 5 – compositions of granitoids Kurmansky massif, according to [Rapoport, Medyakov, 1974; Kubashin, Lykova, 1985]; 6–8 – field compositions: 6 – gabbro, tonalites, plagiogranites of the Reftinsky complex [Fershtater, 2013; Smirnov et al., 2018], 7 – gabbro and trondhjemites of the Averinsky complex [Lobova, et al., 2012], 8 – granodiorites and granites of the Kamensky complex [Fershtater, 2013]. The points of rock compositions in the diagram are calculated for the dry residue.

а трондjemиты главной фазы – граниту, лейкограниту (Прил 1, табл. 1; рис. 4). Жильные разности трондjemитов, интрузирующие габброиды, располагаются в полях кварцевых диоритов, гранодиоритов, гранитов, представляя в разной степени контаминированные разности лейкогранитов. Все породы характеризуются преобладанием натрия над калием, при этом габброиды обладают умеренно-калиевым составом, а гранитоиды – низкокалиевым (рис. 5). Низкокалиевый состав кислых пород определяет их как тоналиты и трондjemиты.

Трондjemиты Курманского массива имеют относительно невысокую величину индекса железистости (FeO/(FeO+MgO) [Frost et al., 2001]), равную 0.65–0.76, и располагаются в поле магнезиальных (известково-

щелочных) пород, тогда как габбро, габбро-диориты и диориты расположены вдоль разделительной линии магнезиальных и железистых серий (рис. 5). На диаграмме (Na₂O+K₂O-CaO)–SiO₂ фигуративные точки трондjemитов ложатся в поле известковой серии, а габбро-диоритов – в поля известковой и известково-щелочной серий (рис. 5).

На дискриминантных диаграммах (рис. 6, а, б) фигуративные точки габбро, габбро-диоритов, диоритов ложатся в поля составов островодужных магматитов. Высокая доля Th и низкая Nb в габброидах указывает на активное участие флюидного компонента слэба в плавлении истощенного редкими элементами мантийного перидотита. Составы трондjemитов располагаются в полях гранитоидов островных дуг (рис. 6, в, г).

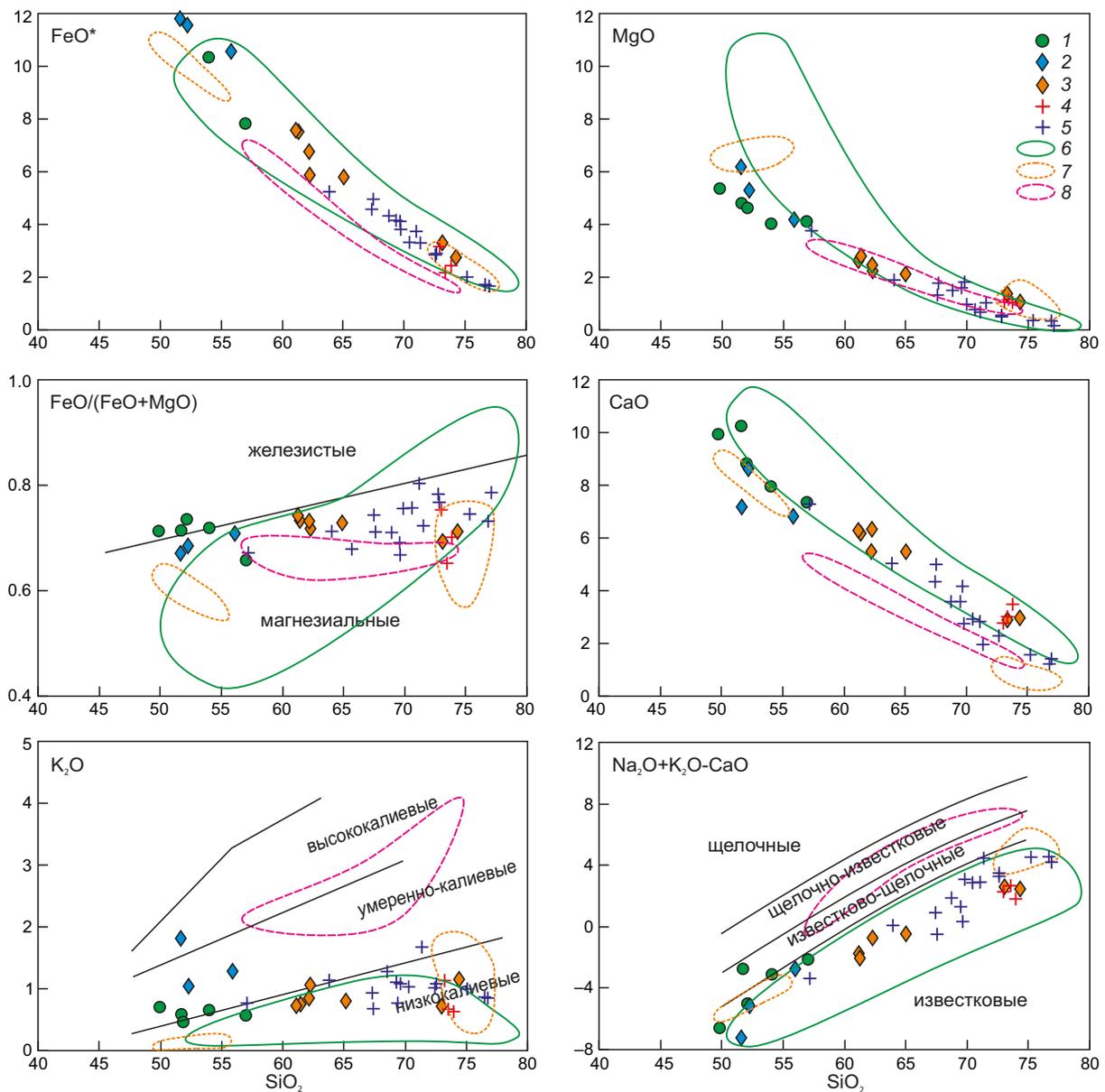


Рис. 5. Диаграммы для пород Курманского массива в сопоставлении с магматическими комплексами района. Условные обозначения см. рис. 4.

Fig. 5. Diagrams for the Kurmansky massif rocks and magmatic complexes of the region. See the legend in Fig. 4.

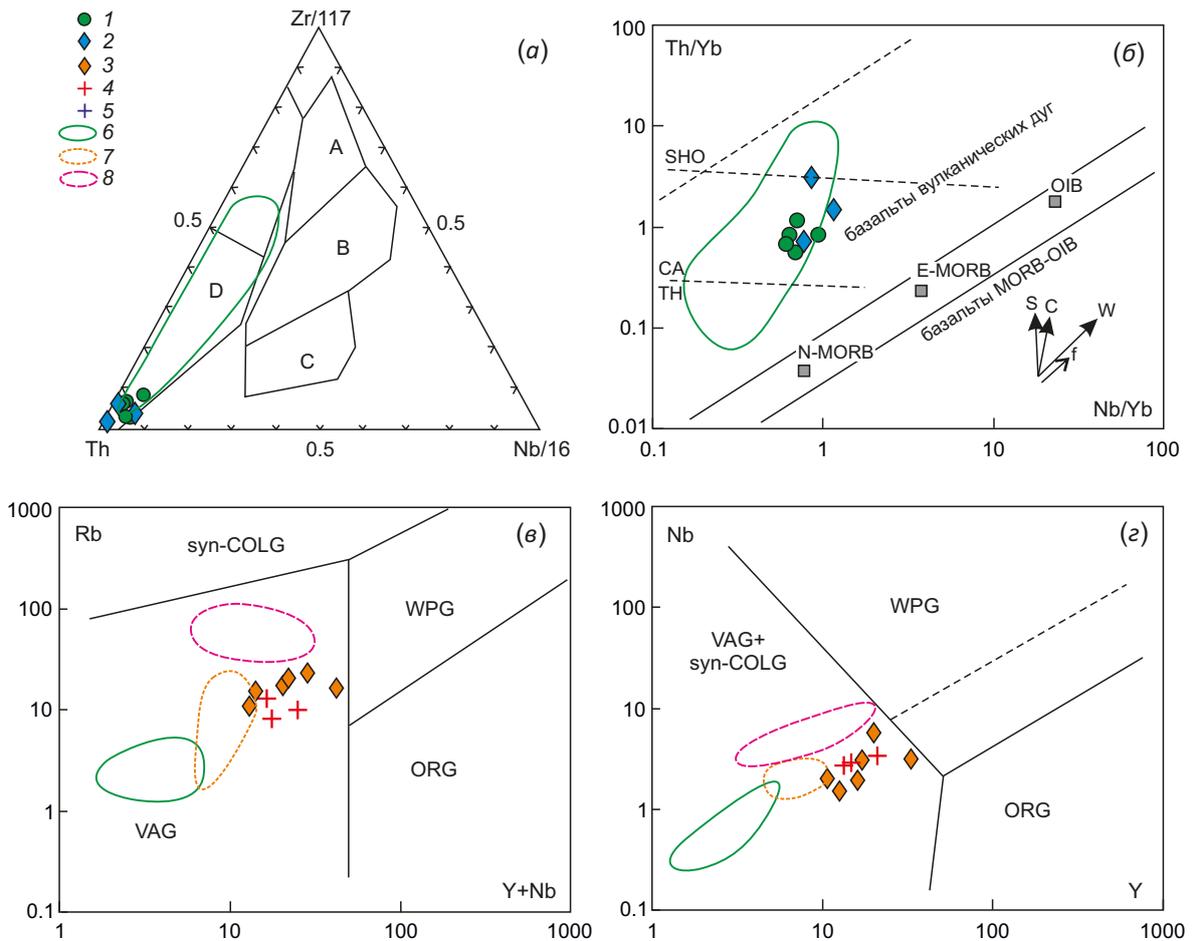


Рис. 6. Геодинамические дискриминантные диаграммы для пород Курманского массива в сопоставлении с магматическими комплексами района.

(а) – диаграмма Th-Zr/117-Nb/16 [Wood, 1980] для основных пород. Поля на диаграмме: А – срединно-океанических хребтов; В – базальты срединно-океанических хребтов и внутриплитных обстановок; С – базальты внутриплитных обстановок; D – базальты островных дуг и активных континентальных окраин. (б) – диаграмма Nb/Yb-Th/Yb [Pearce, 2008] для основных пород. Поля на диаграмме: TH – толеитовые базальты, СА – известково-щелочные базальты, SHO – субщелочные базальты активных континентальных окраин. Стрелками показаны тренды возрастания роли субдукционного компонента (S), коровой контаминации (C), внутриплитного компонента (W) и фракционной кристаллизации (f). (е), (з) – диаграммы (Y+Nb)-Rb и Y-Nb для кислых пород [Pearce et al., 1984]. Поля на диаграммах: VAG – граниты вулканических дуг, syn-COLG – коллизионные граниты, WPG – внутриплитные граниты, ORG – граниты океанических хребтов. Условные обозначения см. на рис. 4.

Fig. 6. Geodynamic discriminant diagrams for the Kurmansky massif rocks and magmatic complexes of the region. (а) – diagram Th-Zr/117-Nb/16 [Wood, 1980] for basic rocks. Fields in the diagram: A – mid-ocean ridges; B – basalts of mid-ocean ridges and intraplate settings; C – basalts of intraplate settings; D – basalts of island arcs and active continental margins. (б) – diagram of Nb/Yb-Th/Yb [Pearce, 2008] for the basic rocks. Fields: TH – tholeiitic basalts, CA – calc-alkaline basalts, SHO – subalkaline basalts of active continental margins. The arrows show the increasing importance of the subduction component (S), crustal contamination (C), within-plate component (W), and fractional crystallization (f). (е), (з) – diagrams (Y+Nb)-Rb and Y-Nb for acid rocks [Pearce et al., 1984]. Fields: VAG – granites of volcanic arcs, syn-COLG – syn-collision granites, WPG – intraplate granites, ORG – granites of oceanic ridges. See the legend in Fig. 4.

5.2. Особенности состава минералов пород

Амфибол. Химический состав амфибола при расчете кристаллохимических коэффициентов на 23 кислорода характеризуется величиной $Ca_B = 1.7-2.0$ и $(Na+K)_A = 0.26-0.45$, отношением $Mg/(Mg+Fe^{2+}) = 0.56-0.63$, что позволяет определить его как чермакит в соответствии с номенклатурой [Leake et al., 1997] или как магнезиальную роговую обманку в соответствии с [Hawthorne et al., 2012]. Отметим, что состав амфибола в разных породах меняется незначительно. В габбро, габбро-

диоритах и диоритах он имеет среднюю величину железистости 0.47, а в трондьемитах – 0.52. Сумма щелочей и содержание алюминия также чуть выше в амфиболе из трондьемитов. РТ-условия кристаллизации амфибола рассчитаны в соответствии с известными термобарометрами (Прил. 1, табл. 2) и составляют 660–690 °С, 7–9 кбар.

Биотит. Величина железистости биотита возрастает от габбро к трондьемиту от 0.37 до 0.47. Отметим более низкие величины железистости биотита

относительно сосуществующего амфибола, что является характерной особенностью глубинных пород и продуктов водного анатексиса [Fershtater, 2013].

Плагиоклаз. Ранее мы сообщали о наличии в породах двух типов плагиоклазов, отличающихся составом: крупных корродированных таблиц состава An_{30-42} в габбро и An_{24-25} в трондjemитах, и образованных по ним мелких грануломорфных зерен. Важно подчеркнуть, что особенностью грануломорфного плагиоклаза является его одинаковый состав во всех типах пород, соответствующий An_{20-24} . При этом небольшое повышение на несколько процентов доли анортитового компонента в краях зерен предполагает возрастание РТ-условий в процессе перекристаллизации.

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

6.1. Происхождение исходных расплавов основного и кислого состава

Процессы частичного плавления и фракционной кристаллизации играют ведущую роль в образовании кислых расплавов [Rushmer, 1991; Beard, Lofgren, 1991; Wolf, Wyllie, 1994; Rapp, Watson, 1995; Zharikov, Khodorevskaya, 2006; и др.]. Составы расплавов, полученные одним из этих способов, следуют соответствующим геохимическим трендам, позволяющим определять вклад

того или иного процесса в генезис породных серий. Предположению о происхождении трондjemитов Курманского массива в результате фракционной кристаллизации расплавов основного состава, родоначальных для ассоциированных с ними габбро, противоречит равная или близкая величина железистости основных и кислых пород, а также близкие содержания в породах калия (см. Прил. 1, табл. 1; см. рис. 5). Эти особенности, напротив, могут указывать на появление кислых расплавов в результате водного плавления роговообманкового габбро в области стабильности амфибола, предполагаемое ранее для Курманского массива в работе [Fershtater, 2013].

На геохимических диаграммах трондjemиты главной фазы массива совместно с жильными трондjemитами, секущими габбро, группируются как вдоль тренда фракционной кристаллизации базитового расплава, соответствующего по составу габбро и габбро-диориту массива (рис. 7, а, в), так и вдоль тренда частичного плавления габбро (рис. 7, б). Совокупность этих данных, скорее всего, служит основанием считать, что исходные расплавы габбро и трондjemитов массива генетически не связаны и имеют различные источники, но они были совместно локализованы в коре. Надо полагать, что ведущим процессом, ответственным за

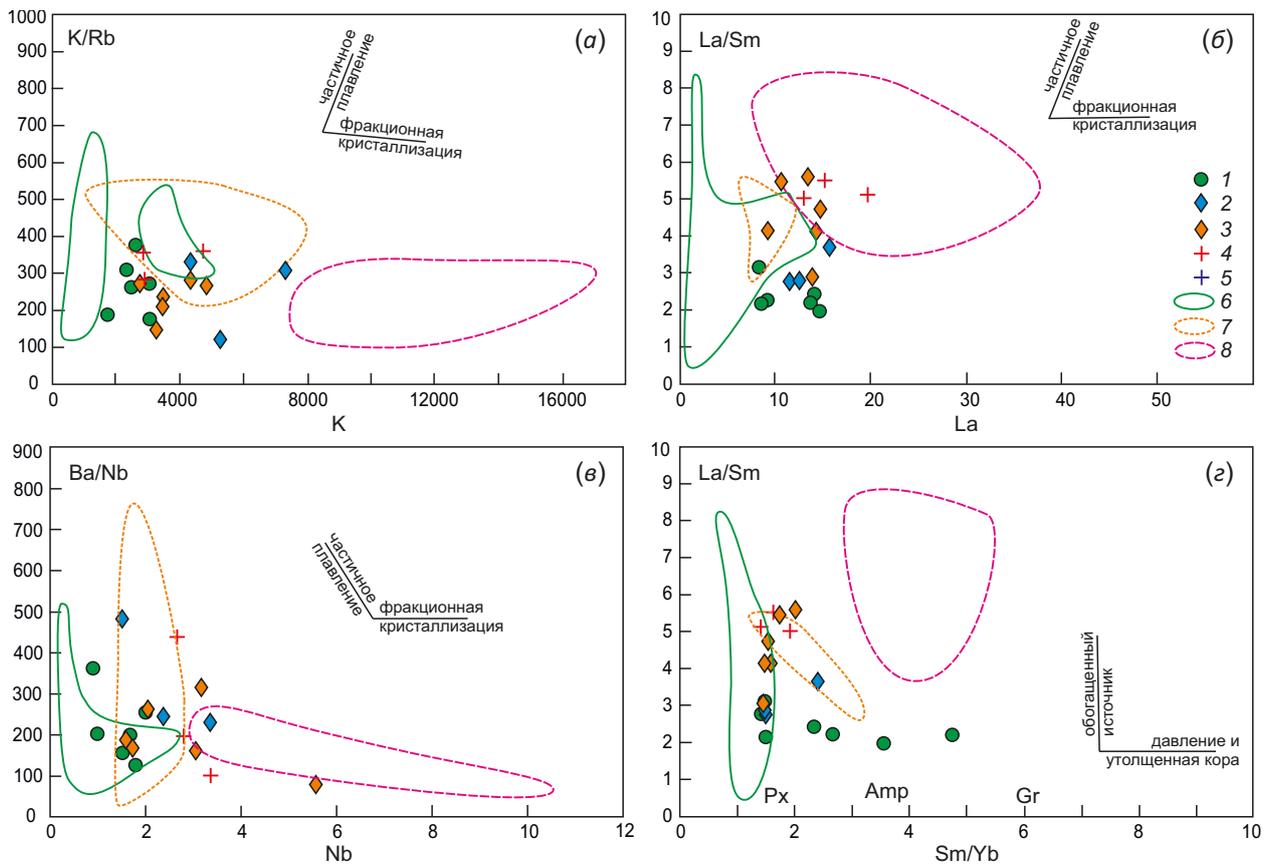


Рис. 7. Диаграммы K/Rb – K, La/Sm – La, Ba/Nb – Nb [Bourdon et al., 2002], La/Sm – Sm/Yb [Kay, Mpodozis, 2001; Zarasvandi et al., 2016] для пород Курманского массива и магматических комплексов района. Условные обозначения см. на рис. 4.

Fig. 7. Diagrams K/Rb – K, La/Sm – La, Ba/Nb – Nb [Bourdon et al., 2002], La/Sm – Sm/Yb [Kay, Mpodozis, 2001; Zarasvandi et al., 2016] for the Kurmansky massif rocks and magmatic complexes of the region. See the legend in Fig. 4.

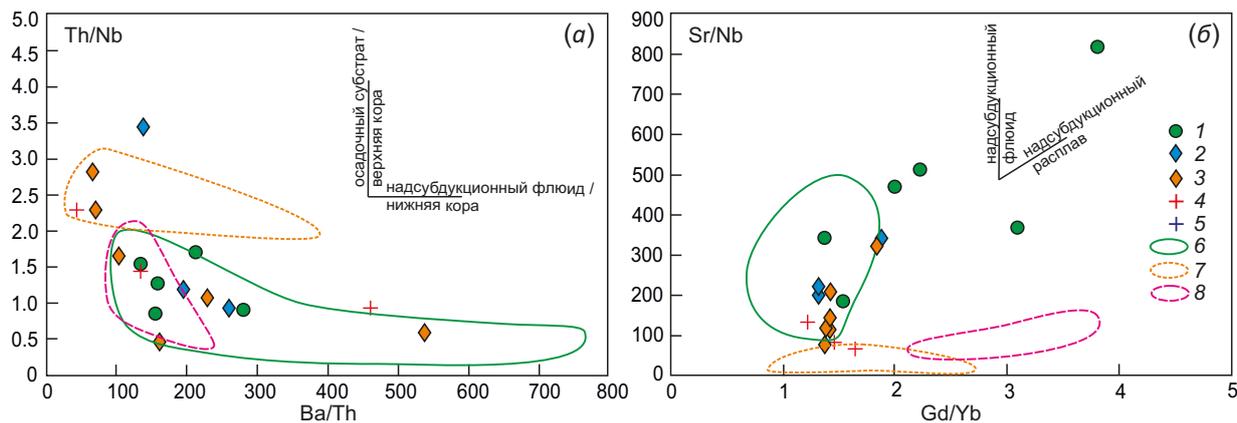


Рис. 8. Диаграммы Th/Nb – Ba/Th [Hanyu et al., 2006] и Sr/Nb – Gd/Yb [Mori et al., 2007] для пород Курманского массива и комплексов района, демонстрирующие участие различных коровых компонентов в метасоматическом обогащении мантии. Условные обозначения см. на рис. 4.

Fig. 8. Diagrams of relations of Th/Nb – Ba/Th [Hanyu et al., 2006] and Sr/Nb – Gd/Yb [Mori et al., 2007] for the Kurmansky massif rocks and magmatic complexes of the region, demonstrating the participation of various crustal components in the metasomatic enrichment of the mantle. See the legend in Fig. 4.

образование трондьемитов массива, было плавление амфиболитов или амфиболовых габбро нижней коры. Габбро, габбро-диориты, диориты образованы в ходе последовательной фракционной кристаллизации базитовой магмы, полученной при частичном плавлении вещества верхней мантии. Причиной плавления мантии могла стать добавка флюидного компонента из зоны субдукции, о чем, в частности? свидетельствует высокое отношение Ba/Th и низкое отношение Th/Nb в породах (рис. 8, а). В то же время повышенные концентрации Si, K, Rb, Sr, Ba, La, рост отношений Sr/Nb и Gd/Yb в габброидах (рис. 8, б) предполагают плавление перидотитов, предварительно метасоматизированных, в том числе и субдукционно-связанными расплавами, имеющими адакитовую химию.

6.2. Условия отделения и кристаллизации расплавов

Низкие значения отношений Sr/Y, La/Yb (см. Прил. 1, табл. 1), Sm/Yb (см. рис. 7, г) в трондьемитах указывают на отсутствие граната в качестве релитовой фазы при плавлении амфиболитового источника. Отсутствие граната, согласно данным [Wolf, Wyllie, 1994; Rapp, Watson, 1995; и др.], определяет область отделения трондьемитовых расплавов при давлении не более 9–12 кбар. Соотношения нормативных компонентов Qz, Ab, An, Or состава позволяют оценить параметры кристаллизации расплавов. Позиция нормативных составов трондьемитов в системе тройных полевых шпатов [Elkins, Grove, 1990] позволяет приближенно оценить температуру начала кристаллизации расплавов в интервале 700–900 °C (рис. 9, а). Зависимость содержания в расплаве нормативного кварца от давления с учетом расчетных температур определяет положение расплавов на РТ-диаграмме (рис. 9, б). Следование составов трондьемитов вдоль линий постоянного содержания воды в 2–4 % указывает на адиабатический характер эволюции

расплавов в процессе их перемещения от места своего зарождения при $9-12 > P_{общ} \geq 8$ кбар и $P_{H_2O} = 0.1-0.2 P_{общ}$, находящегося в области стабильности амфибола (\pm биотита), до места локализации и кристаллизации в верхней коре при $P_{общ} = P_{H_2O} = 1$ кбар.

Развитие волластонитовых скарнов на контакте с трондьемитами позволяет независимо оценить глубину становления массива в коре. Она может быть определена по точке пересечения линий реакций $An + Qz + Cc = Grs + CO_2$ и $Qtz + Cc = Wo + CO_2$ для парагенезиса волластонита с гроссуляром в зависимости от величины мольной доли CO_2 [Schmädicke et al., 2001; Zharikov, Rusinov, 1998]. При величине доли CO_2 , равной 0.2 (типичное значение для магматогенного флюида), минимальное значение давления при формировании гранат-волластонитовых скарнов будет соответствовать 1 кбар. Таким образом, можно уверенно говорить о мезоабиссальном уровне становления Курманского массива.

Реконструкция условий зарождения, эволюции и кристаллизации расплавов габбро, габбро-диоритов и диоритов массива является более сложной задачей. Тем не менее позиция составов габбро вблизи эвтектики $An - Crx - Orx$ при 10 кбар, рассчитанной для составов с железистостью 0.6 (рис. 9, в), указывает на отделение базитового известково-щелочного расплава в условиях верхней мантии. Дайки микрогаббро и микродиоритов в целом следуют изобарическому тренду эволюции габброидов.

6.3. Метаморфизм пород

Развитие во всех породах массива микро- и мелкозернистого кварц-полевошпатового агрегата свидетельствует о проявлении высокотемпературной перекристаллизации (метаморфизма), сопровождаемой грануляцией и разориентировкой субзерен, деанортацией плагиоклаза. Перекристаллизация также обусловила появление эпидота, мелкочешуйчатого биотита

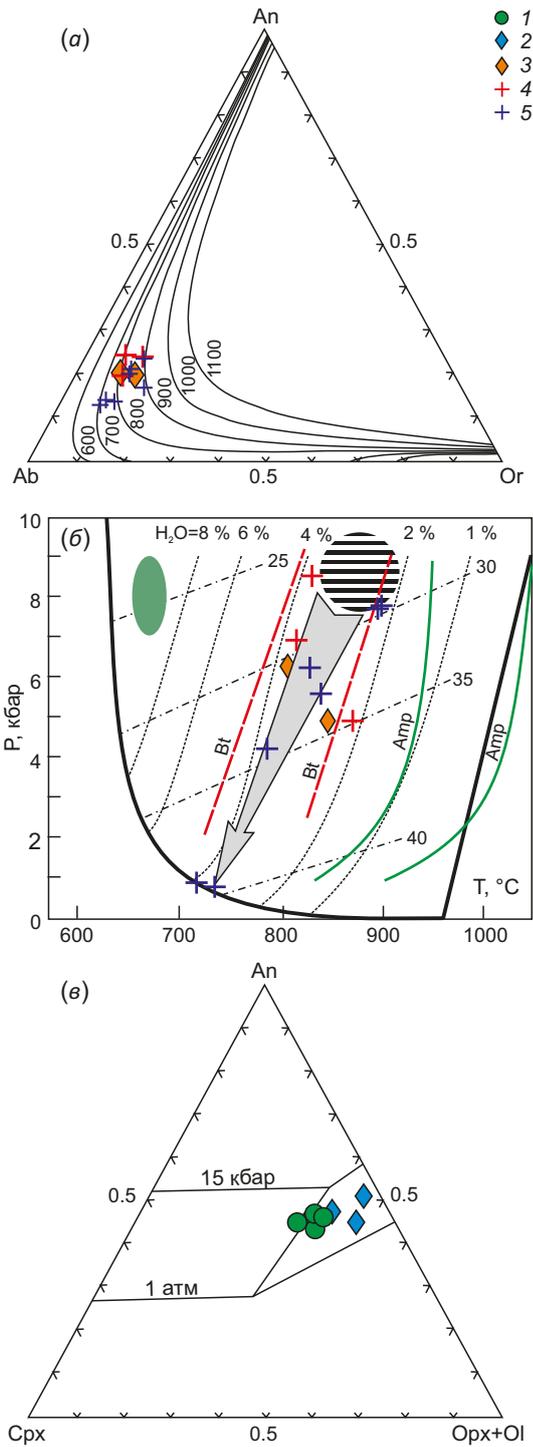


Рис. 9. РТ-условия плавления, кристаллизации и метаморфизма тронджемитов Курманского массива. Условные обозначения см. на рис. 4. (а) – диаграмма An – Ab – Or для гранитных составов. Нормативные количества An, Ab, Or рассчитаны методом CIPW; изотермы – на основе тройной модели полевого шпата для 8 кбар [Elkins, Grove, 1990]. (б) – РТ-диаграмма эволюции тронджемитовых расплавов. Толстые сплошные линии – сухой и мокрый ликвидусы гранитного расплава, тонкие пунктирные линии – содержания воды (мас. %) [Johannes, Holtz, 1996], штрихпунктирные линии – содержания нормативного кварца в системе Qtz – Or – Ab [Fershtater, 1987, рис. 33], пунктирные красные и сплошные зеленые линии – линии стабильности биотита и амфибола по разным авторам [Yoder, Tilley, 1962; Wyllie, Wolf, 1993; Weinberg, Hasalová, 2015, и ссылки в ней]. Горизонтальной штриховкой показана область зарождения тронджемитовых расплавов, а стрелкой – тренд их магматической эволюции. Точки тронджемитов нанесены в соответствии с содержанием нормативного кварца в породе и значением температуры полевошпатового сольвуса. Зеленое поле – область метаморфизма габбро и тронджемитов в соответствии с данными [НВ] Прил. 1, табл. 2. (в) – диаграмма Cpx – An – Орх для базитов. Зелеными кружками и синими ромбами указаны составы габбро, габбро-диоритов, диоритов массива. Котектики An – Cpx – Орх рассчитаны для составов с железистостью 0.6 при 1 атм и 15 кбар. Методику построения диаграммы см. в работе [Fershtater, 1987].

Fig. 9. PT-conditions of melting, crystallization and metamorphism for the Kurmanskyy massif trondhjemites. See the legend in Fig. 4. (a) – triangular diagram An – Ab – Or for granite compositions. Normative quantities of An, Ab, Or are calculated by CIPW; isotherms are calculated on the basis of a triple feldspar model for 8 kbar [Elkins, Grove, 1990]. (b) – PT-diagram of the evolution of trondhjemite melts. Thick solid lines – dry and wet liquiduses of granite melt, thin dotted lines – water content (wt. %) [Johannes, Holtz, 1996], dashed lines – the content of normative quartz in the Qtz – Or – Ab system [Fershtater, 1987, Fig. 33], dotted red and solid green lines are the stability lines of biotite and amphibole according to different authors [Yoder, Tilley, 1962; Wyllie, Wolf, 1993; Weinberg, Hasalova, 2015, and references therein]. The horizontal hatching shows the area of origin of trondhjemite melts, and the arrow shows the trend of their magmatic evolution. Trondhjemite points are plotted in accordance with the content of normative quartz in the rock and the temperature of the feldspar solvus. The green field is the area of metamorphism of gabbro and trondhjemites in accordance with the data [NB] of App. 1, Table 2. (c) – triangular diagram Cpx – An – Орх for basites. Green circles and blue rhombuses indicate the compositions of gabbro, gabbrodiorites, and diorites of the massif. The An – Cpx – Орх cotectics are calculated for compositions with a Fe/Fe+Mg=0.6 at 1 atm and 15 kbar. See [Fershtater, 1987] for the method of the diagram construction.

и амфибола. Последний, вероятно, развивается по первичному пироксену габброидов, чем объясняется его низкая щелочность. Рассчитанные параметры перекристаллизации, согласно данным Прил. 1, табл. 2, отвечают верхам эпидот-амфиболитовой фации (7–9 кбар и 670–690 °С), что не исключает плавления наиболее легкоплавкой части пород с возникновением зон мигматитов вдоль флюидопроводящих каналов. Относительно высокие параметры метаморфизма пород обусловлены их расположением в подошве аллохтонного блока. При этом развитие роговиковоподобных

микроструктур в условиях высоких давлений может объясняться трансформацией стрессового давления в нормальное гидростатическое давление для компетентных блоков пород в зонах надвигов [Kozlovsky, Viryus, 2011; Kulakovskyy et al., 2015].

6.4. Проблема возраста пород

Важным и пока не находящим однозначного решения вопросом является время размещения массива в коре. Значения кластеров U-Pb-возраста циркона габбро и тронджемита в работах [Fershtater, 2013, 2015]

были интерпретированы как время магматической кристаллизации пород в диапазоне 411–397 млн лет. При отсутствии данных корректности значений полученного возраста (MSWD) и наличии показанных нами метаморфических преобразований пород можно высказать предположение о неполном соответствии изотопных систем циркона времени их магматической кристаллизации. Указанные значения возраста скорее находятся в интервале между временем магматической кристаллизации пород (430–420 млн лет), слагающих большую часть рефтинского аллохтона, и временем их метаморфизма (405–380 млн лет). Последнее событие стало результатом аккреции и шарьирования O–S океанических и S–D₁ островодужных комплексов рефтинского аллохтона на Мурзинско-Адуйский террейн в позднем девоне [Smirnov et al., 2014].

6.5. Сопоставление с магматическими комплексами Восточно-Уральской мегазоны

Согласно данным [Puchkov, 2000; Smirnov et al., 2003; Smirnov, Korovko, 2007; и др.], наиболее древними образованиями района являются офиолиты дунит-гарцбургит-габбрового комплекса и вулканогенные образования базальт-дацитового и базальт-андезит-дацитового комплексов с предположительно комагматичными им интрузиями габбро и гранитов силура – нижнего девона (?). После формирования мощных силурийских вулканогенных толщ с низов нижнего девона отмечается затухание, а затем и затишье в магматической активности района, что позволило сформироваться на отдельных участках мощным толщам карбонатного и терригенно-карбонатного состава с позднего силура до среднего девона. Новая магматическая активность вызвала формирование вулканоплутонических комплексов, содержащих ксенолиты силурийских вулканитов и нижнедевонских известняков основания, на котором они были заложены.

Учитывая неоднозначность датировок пород Курманского массива, мы провели сравнение их состава с наиболее точно датированными и геохимически изученными интрузивными комплексами района. В качестве сопоставительного материала были выбраны: рефтинский габбро-диорит-тоналит-плагиогранитовый (435–430 млн лет) и аверинский диорит-трондьемитовый (420–419 млн лет) комплексы островодужной природы [Lobova et al., 2012; Fershtater, 2013; Smirnov et al., 2014, 2018], в полосе развития которых и локализован Курманский массив (см. рис. 1). Отдельно проведено сопоставление курманских трондьемитов с раннеколлизийным каменским гранодиорит-гранитовым комплексом с возрастом 298–309 млн лет [Fershtater, 2013], поскольку именно к этому комплексу на последней Государственной геологической карте был условно отнесен Курманский массив [State Geological Map..., 2017].

Предшествующие магматитам Курманского массива породы рефтинского комплекса (габбро, тоналиты, плагиограниты) обладают сходными низкими

содержаниями K, Rb, Sr, Ba, PЭ и PЗЭ, а их формирование связано с низкобарическим частичным плавлением верхней мантии и базитовой коры на островодужной стадии при участии в магомгенерации флюидного компонента слэба (см. рис. 7, 8). Доказательством этому являются результаты изотопного исследования Sr, Nd, Hf в породах рефтинского комплекса [Smirnov et al., 2018]. Возможно, что возрастающая роль слэбзависимого флюида (±кислый расплав), оказывающего метасоматизирующее воздействие на источники магомгенерации в верхней мантии и коре, впоследствии могла определить формирование более обогащенных Sr, Ba, Rb, PЗЭ расплавов, подобных курманским габброидам. Различия в содержании Y, Sr, Cr, Ni, Co указывают на принадлежность рефтинских габбро к офиолитовым ассоциациям, а курманских габбро – к габбро-гранитным ассоциациям (по [Fershtater, 1987]).

Примыкающие с востока к Курманскому массиву трондьемиты аверинского комплекса (ныне бластомилониты) обладают выраженной отрицательной европиевой аномалией и несколько более низкими содержаниями PЗЭ. Кроме того, они имеют высокоглиноземистый состав (A/CNK=1.2–1.5 [Lobova et al., 2012] против 0.64–0.79 в образованиях Курманского массива). Эти данные указывают на иной источник аверинских трондьемитов, нежели курманских.

Условное отнесение образований Курманского массива к каменскому комплексу [State Geological Map..., 2017] представляется необоснованным, поскольку, помимо отличия в возрасте, они формируют совершенно самостоятельные серии по содержаниям как петрогенных оксидов, так и редких элементов (см. рис. 4, 5, 6, 7, 8).

На основании результатов сопоставления состава пород Курманского массива с иными магматическими сериями рассматриваемого района представляется возможным выделение самостоятельного курманского габбро-диорит-трондьемитового островодужного комплекса раннего девона (?).

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Формирование Курманского габбро-трондьемитового массива связано с заключительными этапами силурийско-раннедевонского островодужного магматизма в Восточно-Уральской мегазоне, сопровождавшимися сближенными по времени и в пространстве процессами частичного плавления верхней мантии и нижней коры. Источником расплавов габбро являлись мантийные перидотиты, испытавшие частичное плавление под воздействием поступающего из зоны субдукции водного флюида. Такие расплавы были отделены и следовали двупироксен-плагиоклазовой котектике при $P = 10$ кбар. Частичное плавление амфиболитов или амфиболовых габбро нижней коры в условиях $P_{\text{общ}} \geq 8$ кбар, $P_{\text{H}_2\text{O}} = 0.1 - 0.2 P_{\text{общ}}$ обусловило формирование исходных расплавов трондьемитов. Кристаллизация основных и кислых пород массива завершилась в мезоабиссальной обстановке при $P_{\text{общ}} = P_{\text{H}_2\text{O}} = 1$ кбар и сопровождалась

формированием волластонитовых скарнов на контактах известковистых пород с трондjemитами. Данная интерпретация генезиса и условий кристаллизации пород массива отличается от ранее предложенного варианта [Fershtater, 2013].

Возраст, геолого-структурная позиция, особенности состава пород Курманского массива (в уточненном объеме) свидетельствуют о принадлежности массива к самостоятельному раннедевонскому (?) магматическому комплексу островодужной природы.

Формирование пород Курманского массива и их метаморфические преобразования, вероятно, обусловлены сближенными по времени процессами магматизма и аккреции раннепалеозойско-раннедевонских островодужных комплексов на Мурзинско-Адуйский террейн в девоне. Особенностью метаморфизма пород массива является развитие роговиковоподобных микроструктур, сформированных в условиях эпидот-амфиболитовой фации умеренных давлений.

8. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю признательность В.И. Квачеву за содействие в сборе материала, Н.С. Бородиной, Е.В. Пушкареву, Г.Ю. Шардаковой и В.Н. Смирнову за конструктивное обсуждение результатов данной работы.

9. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

10. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов. Все авторы прочитали рукопись и согласны с опубликованной версией.

The authors have no conflicts of interest to declare. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

11. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Beard J.S., Lofgren G.E., 1991. Dehydration Melting and Water-Saturated Melting of Basaltic and Andesitic Greenstones and Amphibolites at 1.3 and 6.9 Kb. *Journal of Petrology* 32 (2), 365–402. <https://doi.org/10.1093/petrology/32.2.365>.

Blundy J., Holland T.J., 1990. Calcic Amphibole Equilibria and a New Amphibole-Plagioclase Geothermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 104, 208–224. <https://doi.org/10.1007/BF00306444>.

Bourdon E., Eissele J.-P., Monzier M., Robin C., Martin H., Cotton J., Hall M.L., 2002. Adakite-like Lavas from Antisana Volcano (Ecuador): Evidence for Slab Melt Metasomatism beneath the Andean Northern Volcanic Zone. *Journal of Petrology* 43 (2), 199–217. <https://doi.org/10.1093/petrology/43.2.199>.

Elkins L.T., Grove T.L., 1990. Ternary Feldspar Experiments and Thermodynamic Models. *American Mineralogist* 75 (5–6), 544–559.

Eselevich L.V., Sergievskaya N.V., 1953. Geological Report on the Results of the Work of the Bazhenov Field Party over the Period of 1949–1952. Ural Geological Survey Expedition, Sverdlovsk (in Russian) [Еселевич Л.В., Сергиевская Н.В. Геологический отчет о результатах работ Баженовской ГРП за 1949–1952 гг. Свердловск: УКСЭ, 1953].

Fershtater G.B., 1987. Petrology of Major Intrusive Associations. Nauka, Moscow, 231 p. (in Russian) [Ферштатер Г.Б. Петрология главных интрузивных ассоциаций. М.: Наука, 1987. 231 с.].

Fershtater G.B., 1990. Empirical Hornblende-Plagioclase Geobarometer. *Geochemistry* 3, 328–335 (in Russian) [Ферштатер Г.Б. Эмпирический плагиоклаз-роговообманковый барометр // Геохимия. 1990. № 3. С. 328–335].

Fershtater G.B., 2013. Paleozoic Intrusive Magmatism of the Middle and South Urals. Publishing House of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, 368 p. (in Russian) [Ферштатер Г.Б. Палеозойский интрузивный магматизм Среднего и Южного Урала. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2013. 368 с.].

Fershtater G.B., 2015. Early Devonian Intrusive Magmatism of the Urals as Indicator Critical Stage Paleozoic History Mobile Belt. *Lithosphere* 5, 5–29 (in Russian) [Ферштатер Г.Б. Раннедевонский интрузивный магматизм Урала – индикатор переломного этапа в палеозойской истории подвижного пояса // Литосфера. 2015. № 5. С. 5–29].

Fershtater G.B., Borodina N.S., Bea F., Montero P., 2018. Model of Mantle-Crust Interaction and Magma Generation in the Suprasubduction Orogen (Paleozoic of the Urals). *Lithosphere* 18 (2), 177–207 (in Russian) [Ферштатер Г.Б., Бородина Н.С., Беа Ф., Монтеро П. Модель мантийно-корового взаимодействия и сопряженного магматизма в надсубдукционном орогене (палеозой Урала) // Литосфера. 2018. Т. 18. № 2. С. 177–207]. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-2-177-207>.

Frost B.R., Arculus R.J., Barnes C.G., Collins W.J., Ellis D.J., Frost C.D., 2001. A Geochemical Classification of Granitic Rocks. *Journal of Petrology* 42 (11), 2033–2048. <https://doi.org/10.1093/petrology/42.11.2033>.

Hanyu T., Tatsumi Y., Nakai S., Chang Q., Miyazaki T., Sato K., Tani K., Shibata T., Yoshida T., 2006. Contribution of Slab Melting and Slab Dehydration to Magmatism in the NE Japan Arc for the Last 25 Myr: Constraints from Geochemistry. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 7 (8). <https://doi.org/10.1029/2005GC001220>.

Hawthorne F.C., Oberti R., Harlow G.E., Maresch W.V., Martin R.F., Schumacher J.C., Welch M.D., 2012. Nomenclature of the Amphibole Supergroup. *American Mineralogist* 97 (1–2), 2031–2048. <https://doi.org/10.2138/am.2012.4276>.

Holland T.J., Blundy J., 1994. Non-Ideal Interactions in Calcic Amphiboles and Their Bearing on Amphibole-Plagioclase Thermometry. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 116, 433–447. <https://doi.org/10.1007/BF00310910>.

Johannes W., Holtz F., 1996. Petrogenesis and Experimental Petrology of Granitic Rocks. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 335 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-61049-3>.

Kay S.M., Mpodozis C., 2001. Central Andean Ore Deposits Linked to Evolving Shallow Subduction Systems and Thickening Crust. *Geological Society of America Today* 11, 4–9. [https://doi.org/10.1130/1052-5173\(2001\)011<004:CAODLT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/1052-5173(2001)011<004:CAODLT>2.0.CO;2).

Kozlovsky V.M., Viryus A.A., 2011. Granulite Parageneses in Local Deformation Zones of the Eastern Belomorje. In: *Granulite and Eclogite Complexes in the History of the Earth. Proceedings of Scientific Conference and Scientific Excursion Guide (June 16–18, 2011)*. KarRC RAS, Petrozavodsk, p. 93–97 (in Russian) [Козловский В.М., Вирус А.А. Гранулитовые парагенезисы в локальных зонах деформаций Восточного Беломорья // Гранулитовые и эклогитовые комплексы в истории Земли: Материалы научной конференции и путеводитель научных экскурсий (16–18 июня 2011 г.). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. С. 93–97].

Kubashin N.N., Lykova V.V., 1985. Geological Report on the Results of Further Exploration and Reassessment of the Kurmanskii Building Stone Deposit (Further Exploration of Deep Horizons of the Active Quarry) Conducted in 1982–1985 in the Beloyarsky District, Sverdlovsk Oblast, with the Calculation of Recourses as at 01.01.1986. Middle-Ural Geological Expedition, Verkhnyaya Pyshma (in Russian) [Кубашин Н.Н., Лыкова В.В. Геологический отчет о результатах доразведки и переоценки Курманского месторождения строительного камня (доразведка глубоких горизонтов действующего карьера), произведенной в 1982–1985 гг. в Белоярском районе Свердловской области с подсчетом запасов по состоянию на 01.01 1986 года. В. Пышма: СУГРЭ, 1985].

Kulakovskiy A.L., Morozov Yu.A., Smul'skaya A.I., 2015. Tectonic Stress as Additional Thermodynamic Factor of Metamorphism (Northern Ladoga Region). *Geophysical Research* 16 (1), 44–68 (in Russian) [Кулаковский А.Л., Морозов Ю.А., Смутьская А.И. Тектонический стресс как дополнительный термодинамический фактор метаморфизма // Геофизические исследования. 2015. Т. 16. № 1. С. 44–68].

Leake B., Woolley A., Arps C., Birch W., Gilbert C., Grice J., Hawthorne F., Kato A. et al., 1997. Nomenclature of Amphiboles; Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names. *Mineralogical Magazine* 61 (405), 295–310. <https://doi.org/10.1180/minmag.1997.061.405.13>.

Lobova E.V., Smirnov V.N., Bayanova T.B., 2012. Averinsky Diorite-Trochjemit Complex, Eastern Zone of the Middle Ural. *Lithosphere* 3, 49–64 (in Russian) [Лобова Е.В., Смирнов В.Н., Баянова Т.Б. Аверинский диорит-трондьемитовый комплекс восточной зоны Среднего Урала // Литосфера. 2012. № 3. 49–64].

Mori L., Gómez-Tuena A., Cai Y., Goldstein S.L., 2007. Effects of Prolonged Flat Subduction on the Miocene Magmatic

Record of the Central Trans-Mexican Volcanic Belt. *Chemical Geology* 244 (3–4), 452–473. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.07.002>.

Pearce J.A., 2008. Geochemical Fingerprinting of Oceanic Basalts with Applications to Ophiolite Classification and the Search for Archean Oceanic Crust. *Lithos* 100 (1–4), 14–48. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.06.016>.

Pearce J.A., Harris N.B.W., Tindle A.G., 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology* 25 (4), 956–983. <https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>.

Pribavkin S.V., Zamyatina M.D., Zamyatin D.A., Gulyaeva T.Ya., Kvachev V.I., 2014. Wollastonite Scarns and Associated Cu-Pb-Bi-Mineralization of the Kurmanskii Quarry. In: *Informational Collection of Scientific Papers of IGG UB RAS. Yearbook 2013. Vol. 161*. IGG UB RAS Publishing House, Ekaterinburg, p. 285–289 (in Russian) [Прибавкин С.В., Замятина М.Д., Замятин Д.А., Гуляева Т.Я., Квачёв В.И. Волластонитовые скарны и сопутствующая Cu-Pb-Bi-минерализация Курманского карьера // Информационный сборник научных трудов ИГГ УрО РАН. Ежегодник-2013. Екатеринбург: Изд-во ИГГ УрО РАН, 2014. Вып. 161. С. 285–289].

Puchkov V.N., 2000. Paleogeodynamics of the Southern and Middle Urals. Gilem, Ufa, 146 p. (in Russian) [Пучков В.Н. Палеогеодинамика Южного и Среднего Урала. Уфа: Гилем, 2000. 146 с.].

Rapoport M.S., Medyakov I.A., 1974. Geological Map of the Urals. Scale 1:50000. Sheets O-41-99-Г, O-41-111-Б, O-41-111-Г. Report of the Beloyarsky Geological Survey Party on Further Geological Studies over the Period of 1970–1974. Ural Geological Survey Expedition, Sverdlovsk (in Russian) [Рапопорт М.С., Медяков И.А. Геологическая карта Урала масштаба 1:50000. Листы O-41-99-Г. O-41-111-Б. O-41-111-Г. Отчет Белоярского геологосъемочного отряда о геологическом доизучении за 1970–1974 гг. Свердловск: УКСЭ, 1974].

Rapp R.P., Watson E.B., 1995. Dehydration Melting of Metabasalt at 8–32 Kbar: Implications for Continental Growth and Crust-Mantle Recycling. *Journal of Petrology* 36 (4), 891–931. <https://doi.org/10.1093/petrology/36.4.891>.

Rushmer T., 1991. Partial Melting of Two Amphibolites: Contrasting Experimental Results under Fluid Absent Conditions. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 107, 41–59. <https://doi.org/10.1007/BF00311184>.

Schmädicke E., Okrusch M., Schubert W., Elwart B., Görke U., 2001. Phase Relations of Calc-Silicate Assemblages in the Auerbach Marble, Odenwald Crystalline Complex, Germany. *Mineralogy and Petrology* 72, 77–111. <https://doi.org/10.1007/s007100170028>.

Schmidt M.W., 1992. Amphibole Composition in Tonalite as a Function of Pressure: An Experimental Calibration of the Al-in-Hornblende Barometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 110, 304–310. <https://doi.org/10.1007/BF00310745>.

Smirnov V.N., Fershtater G.B., Ivanov K.S., 2003. The Scheme of the Tectonic-Magmatic Zonation of the Eastern Slope of the Middle Urals. *Lithosphere* 2, 45–56 (in Russian)

[Смирнов В.Н., Ферштатер Г.Б., Иванов К.С. Схема тектоно-магматического районирования территории восточного склона Среднего Урала // Литосфера. 2003. № 2. С. 45–56].

Smirnov V.N., Ivanov K.S., Ronkin Y.L., Serov P.A., Gerdes A., 2018. Sr, Nd, and Hf Isotope Composition of Rocks of the Reft Gabbro-Diorite-Tonalite Complex (Eastern Slope of the Middle Urals): Petrological and Geological Implications. *Geochemistry International* 56 (6), 495–508. <https://doi.org/10.1134/S0016702918060101>.

Smirnov V.N., Ivanov K.S., Travin A.V., 2019. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Age of Rock Deformations across the Bazhenov Suture Zone (Eastern Border of the Middle Urals). *Lithosphere* 19 (2), 242–249 (in Russian) [Смирнов В.Н., Иванов К.С., Травин А.В. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возраст деформаций пород в Баженовской шовной зоне (восточная окраина Среднего Урала) // Литосфера. 2019. Т. 19. № 2. С. 242–249]. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2019-19-2-242-249>.

Smirnov V.N., Korovko A.V., 2007. Paleozoic Volcanism of the Eastern Middle Urals. In: N.P. Jushkin, V.N. Sazonov (Eds), *Geodynamics, Magmatism, Metamorphism, and Ore Formation. Collection of Scientific Papers*. Publishing House of IGG UB RAS, Ekaterinburg, p. 395–420 (in Russian) [Смирнов В.Н., Коровко А.В. Палеозойский вулканизм Восточной зоны Среднего Урала // Геодинамика, магматизм, метаморфизм и рудообразование: Сборник научных трудов / Ред. Н.П. Юшкин, В.Н. Сазонов. Екатеринбург: Изд-во ИГГ УрО РАН, 2007. С. 395–420].

Smirnov V.N., Nastavko E.V., Ivanov K.S., Bayanova T.B., Rodionov N.V., Serov P.A., 2014. The Results of Isotopic Dating of Rocks of the Reftinsky Gabbro-Diorite-Tonalite Complex, Eastern Zone of the Middle Urals. *Lithosphere* 5, 3–18 (in Russian) [Смирнов В.Н., Наставко Е.В., Иванов К.С., Баянова Т.Б., Родионов Н.В., Серов П.А. Результаты изотопного датирования пород Рефтинского габбро-диорит-тоналитового комплекса. Восточная зона Среднего Урала // Литосфера. 2014. № 5. С. 3–18].

State Geological Map of the Russian Federation, 2015. Middle Urals Series. Scale 1:200000. Sheet O-41-XXXII (Kamensk Area). Explanatory Note. Moscow Branch of VSEGEI, Moscow, 274 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия Среднеуральская. Масштаб 1:200000. Лист O-41-XXXII (Каменская площадь): Объяснительная записка. М.: МФ ВСЕГЕИ, 2015. 274 с.].

State Geological Map of the Russian Federation, 2017. Middle Ural Series. Scale 1:200000. Sheet O-41-XXVI (Asbest). Explanatory Note. VSEGEI Publishing House, Saint Petersburg, 284 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия Среднеуральская. Масштаб 1:200000. Лист O-41-XXVI (Асбест): Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2017. 284 с.].

State Geological Map of the USSR, 1987. Scale 1:200000. Middle Ural Series. Sheet O-41-XXVI. Explanatory Note. *Uralgeologiya*, Sverdlovsk, 162 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта СССР. Серия Среднеуральская.

Масштаб 1:200000. Лист O-41-XXVI: Объяснительная записка. Свердловск: Уралгеология, 1987. 162 с.].

Weinberg R.F., Hasalová P., 2015. Water-Fluxed Melting of the Continental Crust: A Review. *Lithos* 212–215, 158–188. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.08.021>.

Wolf M.B., Wyllie P.J., 1994. Dehydration-Melting of Amphibolite at 10 Kbar: The Effects of Temperature and Time. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 115, 369–383. <https://doi.org/10.1007/BF00320972>.

Wood D.A., 1980. The Application of a Th Hf Ta Diagram to Problems of Tectonomagmatic Classification and to Establishing the Nature of Crustal Contamination of Basaltic Lavas of the British Tertiary Volcanic Province. *Earth and Planetary Science Letters* 50 (1), 11–30. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(80\)90116-8](https://doi.org/10.1016/0012-821X(80)90116-8).

Wyllie P.J., Wolf M.B., 1993. Amphibolite Dehydration-Melting: Sorting Out the Solidus. *Geological Society of London Special Publications* 76 (1), 405–416. <http://dx.doi.org/10.1144/GSL.SP.1993.076.01.20>.

Yagovkin V.S., Podkopaeva A.Ya., 1985. Report on Further Exploration of the Kurmanskii Building Stone Deposit in 1964. Ural Geological Survey Expedition, Sverdlovsk (in Russian) [Яговкин В.С., Подкопаева А.Я. Отчет о геологоразведочных работах по доразведке Курманского месторождения строительного камня в 1964 г. Свердловск: УКСЭ, 1985].

Yoder H.S., Tilley C.E., 1962. Origin of Basalt Magmas: An Experimental Study of Natural and Synthetic Rock Systems. *Journal of Petrology* 3 (3), 342–532. <https://doi.org/10.1093/petrology/3.3.342>.

Zamyatina M.D., Borodina N.S., 2015. Conditions of the Rocks Formation of the Kurmansky Gabbro-Trondhjemite Massif (The Middle Ural). In: I.I. Chajkovskij (Ed.), *The Problems of Mineralogy, Petrography and Metallogeny. Scientific Readings in the Memory of P.N. Chirvinsky*. Vol. 18. Publishing House of Perm State University, Perm, p. 167–174 (in Russian) [Замятина М.Д., Бородина Н.С. Условия формирования пород Курманского габбро-тронджемитового массива // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского / Ред. И.И. Чайковский. Пермь: Изд-во ПГНИУ, 2015. Вып. 18. С. 167–174].

Zarasvandi A., Rezaei M., Sadeghi M., Lentz D., Adelpour M., Pourkaseb H., 2016. Rare Earth Element Signatures of Economic and Sub-Economic Porphyry Copper Systems in Urumieh–Dokhtar Magmatic Arc (UDMA), Iran. *Ore Geology Reviews* 70, 407–423. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.01.010>.

Zharikov V.A., Khodorevskaya L.I., 2006. Generation of Granites after Amphibolites. *Petrology* 14, 319–336. <https://doi.org/10.1134/S0869591106040011>.

Zharikov V.A., Rusinov V.L. (Eds), 1998. *Metasomatism and Metasomatic Rocks*. Nauchny Mir, Moscow, 492 (in Russian) [Метасоматизм и метасоматические породы / Ред. В.А. Жариков, В.Л. Русинов. М.: Научный мир, 1998. 492 с.].

Таблица 1. Химический состав (мас. %) и содержание малых элементов (г/т) в породах Курманского массива

Table 1. Chemical composition (wt. %) and content of trace elements (ppm) in the rocks of the Kurmanka massif

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
№ обр.	Ку-4	413	427	Ку-66	Ку-5	401	407	404-1	492	404-2	403	Ку-1	408	428	Ку-6а	412	Ку-2	Ку-3
SiO ₂	48.84	50.69	50.95	52.71	55.97	50.40	51.14	54.48	59.68	59.92	61.03	61.20	64.85	72.55	73.88	71.50	72.38	72.95
TiO ₂	0.86	0.70	0.66	0.89	0.65	0.73	0.67	0.66	0.48	0.49	0.55	0.39	0.44	0.29	0.38	0.36	0.32	0.33
Al ₂ O ₃	16.09	16.97	16.37	17.05	16.97	16.37	17.21	16.92	16.59	17.08	17.27	16.72	16.13	13.18	12.62	14.03	13.74	13.32
Fe ₂ O ₃	9.61	11.77	8.80	4.98	4.64	12.33	11.32	10.30	7.40	7.35	6.64	4.53	5.67	3.02	2.45	3.13	1.35	2.07
FeO	4.60	-	4.60	5.60	3.50	-	-	-	-	-	-	1.70	-	0.50	0.50	-	0.90	0.50
MnO	0.16	0.13	0.16	0.19	0.12	0.17	0.16	0.12	0.09	0.09	0.12	0.09	0.07	0.04	0.07	0.08	0.02	0.02
MgO	5.29	4.70	4.51	3.89	3.99	6.04	5.20	4.14	2.57	2.68	2.44	2.22	2.10	1.44	1.10	1.01	1.14	1.00
CaO	9.77	10.03	8.62	7.76	7.25	7.03	8.51	6.64	6.13	6.06	5.41	6.23	5.44	2.88	3.00	2.78	3.01	3.44
Na ₂ O	2.67	2.30	3.36	4.20	4.63	2.60	2.60	2.80	3.70	3.10	3.40	4.57	4.00	4.78	4.36	3.90	4.96	4.53
K ₂ O	0.70	0.60	0.42	0.65	0.56	1.76	1.05	1.27	0.73	0.76	1.05	0.84	0.84	0.71	1.15	1.14	0.69	0.65
P ₂ O ₅	0.35	0.23	0.15	0.20	0.39	0.17	0.11	0.13	0.15	0.13	0.15	0.22	0.11	0.07	0.13	0.07	0.12	0.14
п.п.п.	0.90	0.54	1.10	0.90	0.70	0.74	0.28	0.60	1.06	1.00	0.18	0.70	0.25	0.50	0.40	0.24	0.50	0.30
Сумма	99.84	98.66	99.7	99.02	99.37	98.34	98.25	98.06	98.58	98.66	98.24	99.41	99.9	99.96	100.04	98.24	99.13	99.25
Li	10.32	14.84	10.04	5.67	4.83	22.01	9.55	13.31	6.88	7.74	6.52	3.52	3.00	13.40	6.39	9.90	7.46	5.48
Rb	10.66	9.60	9.46	7.28	7.63	23.68	13.35	44.27	18.23	21.94	15.72	14.74	16.00	10.46	17.82	13.10	8.02	9.99
Cs	2.24	0.98	1.28	0.13	0.31	2.87	0.61	3.70	1.65	1.87	0.20	0.15	0.34	0.40	0.21	0.21	0.29	0.27
Be	0.50	0.71	0.54	0.59	0.56	0.61	0.78	0.83	0.60	0.71	0.98	0.67	0.36	0.67	0.76	0.62	0.63	0.63
Sr	727	727	505	335	711	512	532	684	574	800	374	330	600	247	236	177	231	443
Ba	323	510	203	232	241	731	576	779	336	439	1036	302	300	515	521	1171	546	336
Sc	28.89	32.22	24.52	32.40	22.66	23.05	26.20	29.36	16.11	17.81	16.33	11.90	15.00	5.25	8.39	7.46	5.99	7.39
V	523	364	285	311	220	239	228	289	162	185	132	107	120	44.28	46.95	34.44	38.15	47.69
Cr	5.54	60.66	8.97	12.86	16.75	5.95	35.90	26.01	10.16	13.71	11.00	7.66	18.00	6.56	2.95	4.94	2.98	3.01
Co	56.26	29.97	30.50	35.92	24.97	26.69	16.96	14.11	9.72	11.87	11.24	46.72	10.00	5.05	48.68	3.83	58.34	40.41
Ni	11.43	18.10	2.38	4.28	7.17	7.58	128.75	8.05	4.49	5.96	4.69	6.30	14.00	0.00	2.33	1.99	2.64	2.23
Cu	173	55.41	60.30	76.78	8.65	38.42	11.47	29.16	39.04	47.21	30.75	133.29	32.00	31.45	4.24	20.60	8.68	4.42

Таблица 1. (продолжение)

Table 1. (continued)

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
№ обр.	Ку-4	413	427	Ку-66	Ку-5	401	407	404-1	492	404-2	403	Ку-1	408	428	Ку-6а	412	Ку-2	Ку-3
Zn	54.63	56.34	49.79	78.12	37.29	70.00	50.94	58.23	33.23	41.33	53.94	34.17	23.00	15.56	44.11	28.63	26.33	19.26
Ga	18.10	18.72	16.30	18.29	17.04	17.10	19.10	21.60	14.56	16.75	18.95	14.94	19.00	13.90	13.30	12.53	13.49	14.18
Y	15.25	26.96	15.31	23.59	23.29	18.73	31.06	30.51	17.14	20.19	34.16	12.65	14.00	10.62	16.91	13.54	14.58	20.99
Nb	0.89	1.99	0.99	1.80	1.52	1.51	2.37	3.36	1.66	5.57	3.18	1.58	1.80	2.06	3.06	2.67	2.81	3.36
Ta	-	0.11	0.07	0.03	0.01	0.06	0.10	0.17	0.10	0.18	0.15	0.16	0.13	0.13	0.10	0.12	0.11	0.19
Zr	13.42	21.71	11.45	7.68	11.23	44.12	8.62	23.69	15.66	21.42	16.02	16.51	26.10	32.53	12.92	24.64	24.19	25.39
Hf	0.64	0.78	0.50	0.52	0.54	1.15	0.44	0.89	0.50	0.64	0.56	0.81	0.70	0.93	0.61	0.77	0.87	0.95
Pb	2.04	2.04	2.20	3.58	3.57	5.45	3.47	4.23	3.67	4.28	3.82	2.37	3.00	4.13	4.61	4.16	4.39	2.74
U	0.74	1.17	0.73	1.11	1.09	3.75	2.13	1.57	0.98	1.18	0.93	1.75	1.10	1.08	2.40	0.98	1.17	4.72
Th	1.52	1.82	1.29	1.50	1.74	5.22	2.24	4.02	2.47	2.71	1.93	4.49	4.20	2.24	5.02	2.54	4.07	7.71
La	13.71	14.67	9.20	8.57	14.11	15.69	12.55	11.53	8.34	14.32	13.90	9.26	11.00	13.44	14.75	13.02	15.21	19.70
Ce	36.44	45.95	23.55	21.93	35.79	40.80	36.55	32.59	19.81	35.59	37.57	19.93	21.00	26.18	31.30	30.61	29.80	41.51
Pr	5.26	6.11	3.51	3.15	5.19	4.63	4.52	4.00	2.57	3.83	4.43	2.45	2.40	3.05	3.81	3.20	3.51	4.83
Nd	25.16	30.06	15.96	14.57	24.62	20.22	20.01	17.69	11.46	16.13	19.98	10.14	10.00	11.60	15.05	12.96	13.41	18.57
Sm	6.23	7.45	4.14	3.94	5.79	4.24	4.48	4.16	2.64	3.45	4.80	2.23	2.00	2.40	3.12	2.59	2.75	3.85
Eu	1.87	2.01	1.21	1.11	1.52	1.07	1.18	1.14	0.80	1.04	1.01	0.80	0.60	0.76	0.82	0.74	0.66	0.94
Gd	4.99	6.47	3.45	4.08	4.96	3.36	4.03	3.98	2.50	3.08	4.61	2.17	2.30	1.64	2.80	2.23	2.48	3.36
Tb	0.63	0.85	0.47	0.66	0.71	0.52	0.68	0.67	0.42	0.51	0.77	0.35	0.30	0.26	0.45	0.35	0.39	0.56
Dy	3.38	4.94	2.94	4.35	4.39	3.37	4.70	4.69	2.95	3.49	5.36	2.23	2.00	1.94	2.89	2.41	2.50	3.73
Ho	0.60	0.92	0.58	0.93	0.90	0.68	1.00	1.00	0.62	0.74	1.12	0.49	0.40	0.39	0.63	0.49	0.53	0.81
Er	1.56	2.43	1.67	2.83	2.69	1.91	2.93	2.96	1.84	2.17	3.24	1.53	1.30	1.29	2.02	1.39	1.64	2.49
Tm	0.21	0.33	0.22	0.41	0.39	0.28	0.45	0.45	0.28	0.32	0.49	0.23	0.18	0.17	0.31	0.20	0.25	0.38
Yb	1.31	2.09	1.55	2.64	2.46	1.78	3.04	3.02	1.82	2.16	3.26	1.52	1.20	1.18	2.03	1.35	1.69	2.74
Lu	0.18	0.30	0.22	0.40	0.36	0.26	0.45	0.46	0.27	0.31	0.46	0.24	0.18	0.21	0.32	0.20	0.26	0.43
f	0.58	0.56	0.61	0.59	0.52	0.51	0.52	0.55	0.59	0.58	0.58	0.59	0.57	0.55	0.58	0.61	0.51	0.57
Sr/Y	47.6	27.0	33.0	14.2	30.5	27.4	17.1	22.4	33.5	39.6	10.9	26.1	42.9	23.2	14.0	13.1	15.8	21.1
La/Yb	10.5	7.1	5.9	3.2	5.7	8.8	4.1	3.8	4.6	6.6	4.3	6.1	7.2	11.4	7.3	9.6	9.0	7.2

Таблица 1. (продолжение)

Table 1. (continued)

№ п/п	19**	20**	21***	22***	23*	24**	25*	26***	27*	28*	29*	30***	31*	32*	33*	34*	35**
№ обр.	C-20/ 36.0	C-29/ 4.0	KC-3/ 35	KC-3/ 17-36	C-61/ 20.0	C-30/ 6.0	C-61/ 43.0	4462	C-62/ 36	C-6Г/ 58.5	C-60/ 15.0	1506-1	C-62/ 11.0	C-63/ 35.0	C-60/ 50.5	C-3Г/ 60.0	18
SiO ₂	55.82	63.22	65.20	66.36	66.36	67.50	68.28	68.60	68.68	69.34	70.06	70.44	71.40	71.74	74.56	75.22	76.00
TiO ₂	0.66	0.50	0.55	0.46	0.44	0.36	0.44	0.40	0.44	0.40	0.38	0.34	0.35	0.34	0.29	0.28	0.24
Al ₂ O ₃	18.19	17.29	15.32	15.66	14.87	15.02	14.35	15.00	15.44	15.42	14.64	14.84	14.40	14.95	13.67	13.02	13.12
Fe ₂ O ₃	2.50	1.86	2.25	2.11	2.40	1.44	1.57	1.66	0.92	1.31	1.81	0.90	0.94	1.05	0.35	0.51	0.70
FeO	5.50	3.56	3.08	2.65	2.75	2.99	2.67	2.66	2.96	2.11	1.63	2.93	2.04	1.89	1.69	1.26	1.01
MnO	0.10	0.11	-	-	0.06	0.09	0.05	0.05	0.10	0.07	0.07	0.06	0.07	0.06	0.05	0.04	0.03
MgO	3.91	2.15	1.55	1.61	2.03	1.78	2.06	1.88	1.25	1.08	1.28	0.95	0.90	0.81	0.70	0.65	0.45
CaO	7.21	5.10	5.71	4.39	5.04	3.69	4.21	3.65	2.85	3.01	2.06	2.94	2.37	2.41	1.70	1.32	1.58
Na ₂ O	3.26	4.20	4.08	4.45	4.00	4.36	3.86	3.98	4.92	4.90	4.91	4.69	4.91	4.74	5.27	5.08	4.98
K ₂ O	0.73	1.11	0.43	0.92	0.65	1.24	0.76	1.08	1.06	1.00	1.63	1.19	1.04	0.99	0.99	0.85	0.84
P ₂ O ₅	0.10	0.11	0.16	0.14	-	0.02	-	0.11	-	-	-	0.08	-	-	-	-	0.02
п.п.п.	1.10	0.64	1.16	1.35	1.43	0.58	1.50	0.77	0.89	1.17	0.80	0.80	0.88	0.96	0.88	1.05	0.27
Сумма	99.08	99.84	99.49	99.74	100.0	99.07	99.35	99.83	99.48	99.66	100.55	100.16	99.30	99.94	100.16	99.28	99.24
f	0.52	0.57	0.65	0.61	0.57	0.57	0.52	0.55	0.63	0.63	0.58	0.68	0.64	0.66	0.61	0.59	0.67

Примечание. 1–5 – габбро, габбро-диориты, диориты; 6–8 – дайки микрогаббро и микрогаббро-диоритов; 9–14 – жильные тронджемиты, в разной степени контаминированные; 15–18 – тронджемиты главной фазы; 19 – метадиорит; 20–27 – тоналиты; 28–35 – тронджемиты и аплиты (33–35). Анализы 19–35 – данные геологосъемочных работ: * – [Kubashin, Lykova, 1985], ** – [Yagovkin, Podkopaeva, 1985], *** – [Rapoport, Medyakov, 1974].

Note. 1–5 – blocks of gabbro, gabbrodiorite, diorite; 6–8 – dikes of microgabbro and microgabbrodiorites; 9–14 – vein trondhjemites, contaminated to varying degrees; 15–18 – trondhjemites of the main phase; 19 – metadiorite; 20–27 – tonalites; 28–35 – trondhjemites and aplites (33–35). Analyzes 19–35 – geological survey data: * – [Kubashin, Lykova, 1985], ** – [Yagovkin, Podkopaeva, 1985], *** – [Rapoport, Medyakov, 1974].

Таблица 2. РТ-параметры минеральных равновесий пород Курманского массива

Table 2. РТ parameters of mineral equilibria of rocks of the Kurmanka massif

№ обр.	[НВ]	[НВ]	[F]	[S]	№ обр.	[НВ]	[НВ]	[F]	[S]	№ обр.	[НВ]	[НВ]	[F]	[S]
Габбро, габбро-диориты					Микрогаббро-диориты, микродиориты					Тронджемиты				
413	8.8–9.2	664–692	9.0–9.5	9.0	401	6.7–7.1	664–673	8.0–8.5	6.6–7.0	403	7.0–8.3	678–692	8.0–9.5	7.2–8.3
427	8.1–8.8	676–684	7.0–8.0	8.1–8.9	404-1	7.7	686	8.8	7.6	408	8.9–9.3	669–676	10.0	8.9–9.2
Ку-4	7.4–9.0	682–691	8.0–9.0	7.7–9.2	407	6.8–8.2	668–684	7.2–9.0	6.7–8.3					

Примечание. Значения давления и температуры приведены в кбар и °С: НВ – по [Blundy, Holland, 1990; Holland, Blundy, 1994], F – по [Fershtater, 1990], S – по [Schmidt, 1992].

Note. The pressures and temperatures are given in kbar and °C: НВ – according to [Blundy, Holland, 1990; Holland, Blundy, 1994], F – after [Fershtater, 1990], S – according to [Schmidt, 1992].