

Геохимия амфиболитов, ассоциирующих с офиолитовыми массивами Урала (на примере Рай-Иза и Среднего Крака) как ключ к пониманию проблемы их происхождения

©2024 И. Р. Рахимов[✉], А. А. Самигуллин

*Институт геологии УФИЦ РАН,
ул. Карла Маркса, 16/2, 450077, Уфа, Российская Федерация*

Аннотация

Введение: амфиболиты часто залегают в обрамлении офиолитовых массивов, однако их взаимо-связь не всегда однозначна. С целью выяснения их источника и условий формирования проведены минералого-геохимические исследования амфиболитов кэршорского (Полярный Урал) и сухоляндского (Южный Урал) комплексов, приуроченных к офиолитовым массивам Рай-Из и Средний Крака соответственно.

Методика: петрографические и минералогические исследования проведены с помощью оптической (Альтами Полар 3) и сканирующей электронной (Tescan Vega Compact) микроскопии. Химический состав пород изучен при помощи рентгенофлуоресцентного анализа (X-Calibur) и масс-спектрометрии с индуктивно связанный плазмой (Agilent 7500cx).

Результаты и обсуждение: для изученных амфиболитов наиболее характерна гнейсовидная текстура и нематогранобластовая структура, а главный минерал амфибол по составу отвечает магнезиогорнбледиту, саданагаиту и паргаситу. Амфиболиты кэршорского комплекса сравнительно однородны по химическому составу (Th и Nb-Ta минимум, Sr-максимум), по данным геотермобарометрии амфиболя и плагиоклаза они образовались при $T=673-586$ °C и $P=7.7-4.9$ кбар. Амфиболиты сухоляндского комплекса образовались при $T=776-681$ °C и $P=4.9-2.6$ кбар, они весьма разнообразны по геохимическим особенностям (с Th и Nb-Ta как минимумом, так максимумом, разным характером Eu-аномалии), что позволило предположить гетерогенную природу их протолита.

Выводы: геохимические особенности кэршорских амфиболитов свидетельствуют об их происхождении из базитового субстрата, аналогичного известково-щелочным базальтам островной дуги. Для амфиболитов сухоляндского комплекса предложены следующие типы протолитов: 1) известково-щелочные базиты островной дуги, 2) толеитовые базиты островной дуги и 3) вулканогенно-осадочные (туфогенные) породы островной дуги. Совокупность полученных минералого-геохимических данных свидетельствует о том, что изученные амфиболиты могут быть частями офиолитовых ассоциаций надсубдукционного типа.

Ключевые слова: Урал, офиолиты, амфиболит, островодужные базиты, геохимия, термобарометрия.

Источник финансирования: Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта РНФ № 22-17-00019.

Для цитирования: Рахимов И. Р., Самигуллин А. А. Геохимия амфиболитов, ассоциирующих с офиолитовыми массивами Урала (на примере Рай-Иза и Среднего Крака) как ключ к пониманию проблемы их происхождения // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2024. № 4. С. 35–50. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/4/35-50>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

[✉] Рахимов Ильдар Рашитович, email: rigel92@mail.ru

Введение

Габбро-пироксенитовые ассоциации, объединяющие в так называемые полосчатые комплексы, являются неотъемлемой частью офиолитовых массивов [1–3]. В ненарушенных разрезах установлена их закономерная последовательность снизу вверх: дуниты – верлиты – оливиновые клинопироксениты – клинопироксениты – габбро [4]. Однако нередко указанные породы превращены в амфиболиты или родингиты при метаморфизме во время подъёма к земной поверхности. Согласно современным представлениям, амфиболиты, пространственно ассоциирующие с офиолитовыми комплексами, могут являться как их метаморфизованными базитовыми частями, так и переработанными породами неофиолитовых комплексов. Их генетическая интерпретация осложнена наложенными тектоническими событиями, в результате которых сильно нарушено первичное геологическое положение. В связи с этим геохимические методы исследований могут быть ключевыми. Возникшие по магматическому протолиту породы называются ортоамфиболитами, а по осадочному – параамфиболитами [5].

Данная работа посвящена вопросам происхождения амфиболитов из зон обрамления двух офиолитовых массивов Урала – Рай-Из (Полярный Урал) и Средний Крака (Южный Урал), относимых к кэршорскому и сухолядскому комплексам соответственно. На основе минералого-геохимического исследования обсуждаются предполагаемые протолиты и условия образования амфиболитов.

Геологическое строение

На серии современных государственных геологических карт Урала масштаба 1:1000000 выделяется Войкаро-Кемпирсайский меланжевый комплекс, приуроченный к Главному Уральскому глубинному разлому (ГУР) (рис. 1а), трассирующему крупнейший в мире пояс офиолитов ордовикского возраста. На Полярном Урале к нему относятся такие крупные массивы как Войкаро-Сынинский и Рай-Из [1]. На Южном Урале в зоне ГУР размеры офиолитовых массивов существенно скромнее, однако к западу от разлома имеются крупные альлохтоны (Кракинский, Хабаринский), также относимые к офиолитовым [6].

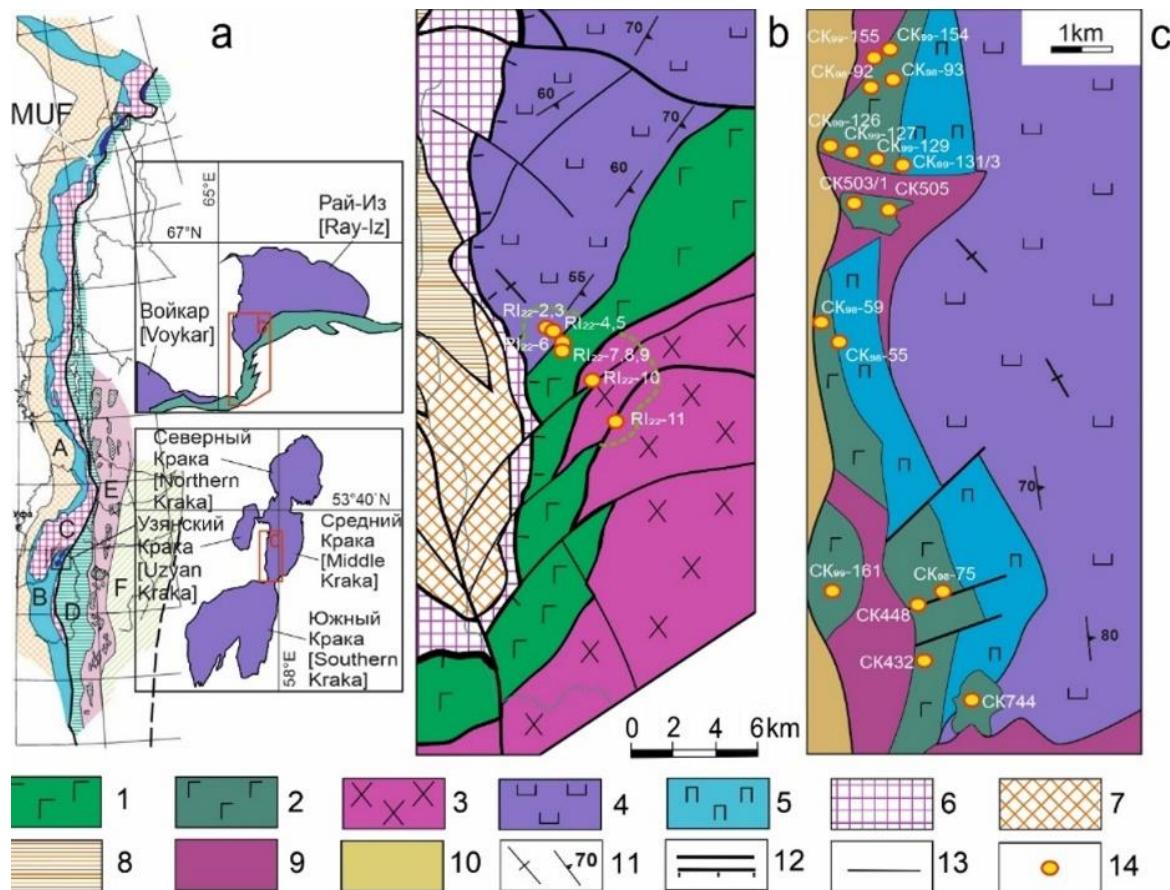


Рис. 1. Структурная схема Урала (а) по [6] и схемы геологического строения районов распространения амфиболитов, ассоциированных с массивами Рай-Из (б) по [7] и Средний Крака (с) по [12]: А – Предуральский прогиб, В – Западно-Уральская зона, С – Центрально-Уральская зона, D – Тагило-Магнитогорская зона, Е – Восточно-Уральская зона, F – Зауральская зона, MUF – Главный Уральский разлом; 1 – породы кэршорского комплекса, 2 – породы сухолядского комплекса, 3 – диориты собского комплекса, 4 – перидотиты, 5 – клинопироксениты и верлиты, 6–8 – различные метаморфические породы (6 – амфиболитовой, 7 – эпидот-амфиболитовой и 8 – зеленосланцевой фации), 9 – серпентиниты, 10 – осадочные породы Зилаирского синклиниория, 11 – полосчатость и направление падения, 12 – разрывные нарушения, 13 – границы породных ассоциаций, 14 – точки пробоотбора. Пунктирной линией обозначен ареал амфиболитов.

[Fig. 1. Structural scheme of Urals (a) after [6] and geological structure schemes of the amphibolite distribution areas associated with the Rai-Iz massif (b) according to [7] and Middle Kraka (c) according to [12]: (A) – Preuralian foredeep, (B) – West Uralian Zone, (C) – Central Uralian Zone, (D) – Tagil-Magnitogorsk Zone, (E) – East Uralian Zone, (F) – Transuralian Zone, (MUF) – Main Uralian Fault; (1) – Kaershore complex rocks, (2) – Sukholayad complex rocks, (3) – Sob complex diorites, (4) – peridotites, (5) – clinopyroxenites and wehrlites, (6–8) – various metamorphic rocks: (6) – amphibolite, (7) – epidote-amphibolite and (8) – greenschist facies, (9) – serpentinites, (10) – sedimentary rocks of the Zilair synclinorium, (11) – banding and strike direction, (12) – faults, (13) – boundaries of rock associations, (14) – sampling points. The dotted line indicates the area of amphibolites.]

Гипербазитовый массив Рай-Из совместно с Войкаро-Сынинским расположен в основании коровомантийного разреза Войкарской палеозойской острородоводной зоны, надвинутой по Главному Уральскому разлому на край палеоконтинента Лаврессия [7]. В северной части Рай-Из надвинут на глинистые сланцы и граувакки девонско-каменноугольного возраста. С северо-восточной и восточной части он ограничен надвигом с зоной серпентинитового меланжа, отделяющий его от Харбейского метаморфического блока, представленного раннепротерозойскими амфиболитами и гнейсами. С запада Рай-Из граничит с Харамалатоуским метаморфическим блоком, сложенным гнейсами и сланцами позднепротерозойского возраста. С юга массив обрамлён полосой надвинутых на него пород кэршорского дунит-верлит-клинопироксенит-габбрового комплекса (рис. 1), датированного U-Pb методом по циркону от 418 до 454 млн лет [8, 9]. Наиболее распространёнными породами кэршорского комплекса являются милонитизированные габброиды и сменяющие их к югу апогаббровые амфиболиты [7]. Южнее их сменяют метаморфизованные габбро-диорит-тоналиты собского комплекса. Происхождение этого комплекса связывают либо с габбро-амфиболитами, относимыми к кэршорскому комплексу с позднесилурийско-раннедевонскими датировками [9], либо к самостоятельному комплексу оphiолитового или островодужного происхождения [7]. По мнению [9] амфиболитизированные габброиды, обрамляющие с юга массив Рай-Из, не являются генетически единными, а подразделяются на оphiолитовые (непосредственно примыкающие к гипербазитам в вогнутой части массива) и постофиолитовые (островодужные). Наши исследования южной зоны распространения амфиболитов кэршорского комплекса показали, что они развиты более широко, чем это показано на геологических картах, частично покрывая области распространения гипербазитов и пород собского комплекса (рис. 1b). И если контакт с гипербазитами чёткий тектонический, то ясной границы с породами собского комплекса мы не смогли выявить. Обнажения амфиболитов представляют собой обширные поля курумов, реже скальные обнажения по отвесным берегам рек (например, р. Макар-Рузь) и склонам холмов (рис. 2a). Во многих местах, особенно в средней части полосы развития амфиболитов проявлены жилы горнблендитов и плагиоклазитов мощностью до 0.5 м, иногда образующие параллельные серии (рис. 2a). В представительных скальных обнажениях заметно, что отдельные крупные блоки пород разноориентированы друг относительно друга, местами видны элементы будинажа (рис. 2b).

Гипербазитовые массивы Крака (включают Север-

ный, Узянский, Средний и Южный Крака) расположены на северном замыкании Зилаирской синклинальной зоны, выполненной позднедевонско-раннекаменноугольными терригенными отложениями флишевой формации, залегающими на континентальной окраине Лаврессии [6]. Наиболее популярным является представление об алохтонном залегании Крака на зилаирских породах, на что указывает тектонический контакт с широким развитием зон меланжа [2]. В составе меланжа отмечались блоки вулканогенно-осадочных пород разного возраста (ордовик, силур, девон). Геохронологические исследования проводились лишь для лерцолитов Северного и Узянского Крака. Методом Sm-Nd геохронологии шпинелевые лерцолиты Северного Крака датированы временем 545 ± 26 млн лет [10]. Для Среднего Крака А.А. Краснобаевым с соавторами выделены два основных кластера U-Pb датировок по циркону – 590–550 и 445–390 млн лет [11]. Первый они связали с глубинным расслоением лерцолитового блока при заложении зоны рифтогенеза на континентальном основании, а второй – с перемещением массива на верхнекоровий уровень. Наибольшим разнообразием пород отличается преимущественно лерцолит-гарцбургитовый массив Средний Крака, в котором также отмечаются и дуниты, верлиты, пироксениты, габброиды, превращённые в амфиболиты. Последние фрагментарно обнажены в юго-западной части массива в виде разноразмерных тектонических блоков (рис. 1b), перемешанных с блоками метаосадочных и метавулканических пород и серпентинитами. Большая часть массива залесена и задернована. Нами были опробованы “габброидные” блоки западной части Среднего Крака (рис. 1b), относимые к сухоляндскому комплексу. Иногда в них присутствуют дайки амфиболизированных долеритов.

Методика

На рис. 1b, с обозначены точки пробоотбора амфиболитов. Петрографическое изучение проведено на оптическом поляризационном микроскопе Альтами Поплар 3 (Россия). Составы минералов исследовались в тонких полированных пластинках из пяти образцов кэршорского и трёх – сухоляндского комплексов – на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega Compact (Чехия) при помощи ЭДС-спектрометра Xplorer 15 (Великобритания) в ИГ УФИЦ РАН (Уфа).

Рентгенофлуоресцентный анализ проведён на энергодисперсионном спектрометре X-Calibur (Израиль) в ИГ УФИЦ РАН для 8 проб кэршорского и 19 проб сухоляндского комплексов. Пределы обнаружений для петрогенных элементов составляли от 0.01 до 0.02 мас. %, для V, Ni и Cr – в диапазоне 5–10 г/т. Для построения калибровочных графиков использовались аттесто-

ванные государственные образцы магматических пород. Определение микроэлементного состава выполнено на масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой Agilent 7500cx (США) в Томском региональ-

ном ЦКП (Томск) в 4 пробах кэршорского и 14 пробах сухолядского комплексов. Вскрытие проб проводилось в смеси фтороводородной и азотной кислот с использованием микроволновой печи.

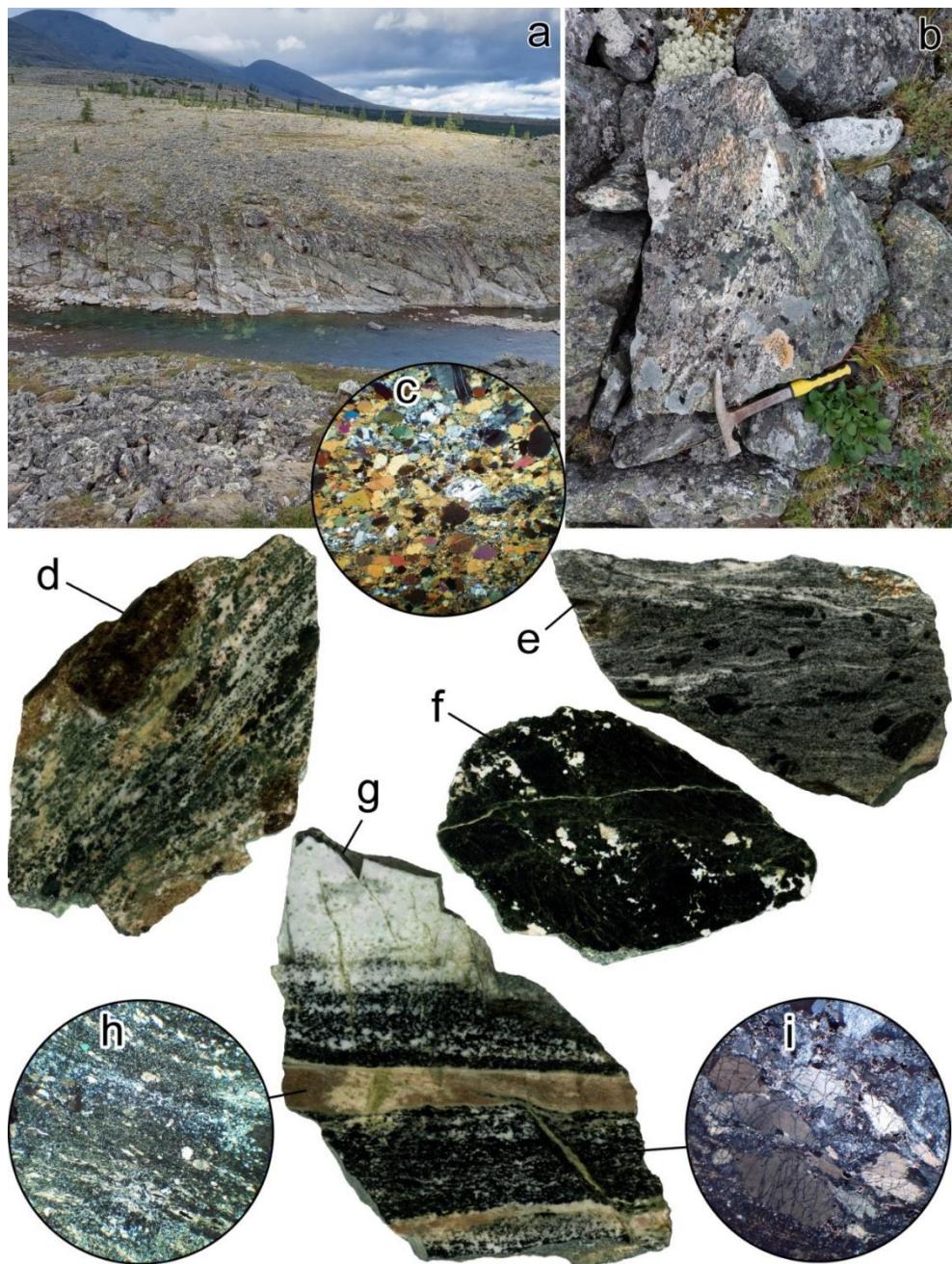


Рис. 2. Коллаж фотографий обнажений, образцов (пришлифовок) и шлифов (николи \times) амфиболитов кэршорского (a–c) и сухолядского (d–i) комплексов: a – скальный берег р. Макар-Рузь с обнажением гнейсовидных амфиболитов, пересечённых жилами пластиоклазитов, с курумом в долине; b – блок пятнисто-гнейсовидного амфиболита с будиной пластиоклазита; c – микрофотография гнейсовидного амфиболита ($\varnothing=8$ мм); d – гнейсовидный амфиболит (длина образца $d=10.5$ см, обр. SK448); e – очково-полосчатый амфиболит ($d=8$ см, обр. SK99-131/2); f – пятнистый гигантозернистый амфиболит ($d=7$ см, обр. SK98-92/1); g – полосчатый амфиболит с прослойками кварц-альбит-хлорит-титанит-гранатового метасоматита ($d=10$ см, обр. SK432); h и i – микрофотографии основной массы образца g ($\varnothing=4$ мм).

[Fig. 2. Collage of photographs of outcrops, samples (polished sections) and thin sections (xpl) of amphibolites of the Kaershore (a–c) and Sukholiad (d–i) complexes: (a) – rocky bank of the Makar-Ruz river with an outcrop of gneissic amphibolites crossed by plagioclase veins, with boulder stream in the valley; (b) – block of spotted gneissic amphibolite with boudin element; (c) – photomicrograph of gneissic amphibolite ($\varnothing=8$ mm); (d) – gneissic amphibolite ($d=10.5$ cm, sample SK448); (e) – banded amphibolite ($d=8$ cm, sample SK99-131/2); (f) – spotted giant-grained amphibolite ($d=7$ cm, sample SK98-92/1); (g) – banded amphibolite with layers of quartz-albite-chlorite-titanite-garnet metasomatite ($d=10$ cm, sample SK432); (h and i) – microphotographs of the bulk of the sample g ($\varnothing=4$ mm).]

Результаты

Петрография и минералогия

Полосчатые плагиоклаз-амфиболовые породы кэршорского и сухолядского комплексов имеют гнейсовидную, очковую, пятнистую и реже плойчатую текстуру с нематобластовой, нематогранобластовой, гомеобластовой, а в единичных образцах с порфиро- и пойкилобластовой структурой (рис. 2с-и). Содержание амфибола обычно варьирует в пределах 30–90 об. %, что позволяет отнести эти породы к амфиболитам [5, 12]. В обр. СК432 помимо амфиболовых меланосом и плагиоклазовых лейкосом отмечены цветные прослойки предположительно метаосадочного (терригенного) происхождения (рис. 2г), сложенные кварц-альбит-хлорит-титанит-гранатовым полосчатым агрегатом, рассечённым жилками эпидота. В этих прослойках обнаружены мелкие окатанные зёрна кварца и циркона. Кроме того, признаки присутствия терригенного субстрата отмечаются в образцах СК99-154 и СК99-161/2. В первом среди крупных зёрен амфибола и альбита отмечаются разноразмерные угловатые или слегка окатанные обломочные зёрна кварца, неравномерно распределённые в мелкодисперс-

ной (метапелитовой?) массе (рис. 2j). Во втором – ксеноморфные необласти кварца, состоящие из некогда отдельных дегритовых зёрен.

Амфибол является главным или одним из главных минералов изучаемых пород. Он макроскопически чёрный, в шлифах светло-зелёный, плеохроирует до бледно-бурового. Зёрна удлинённо-призматические, реже изометричные, достигают 10–15 см в длину, обычно в пределах 0.1–5 см. На классификационной диаграмме (рис. 3а) составы кэршорских амфиболов образуют прямолинейный тренд от магнезиогорнблэндита до саданагаита. При этом точки составов кристаллов отдельных проб ложатся обособленно – в поле магнезиогорнблэндита (обр. RI₂₂-5) или только саданагаита (обр. RI₂₂-2). Амфиболы сухолядского комплекса менее глинозёмистые и попадают в поля магнезиогорнблэндита и паргасита, не пересекаясь с составами кэршорских амфиболов. Также поля составов минерала из отдельных образцов (СК432, СК744 и СК99-131/3) почти не перекрываются (рис. 3а). При этом для всех изученных зёрен характерна отрицательная корреляция между железом и магнием.

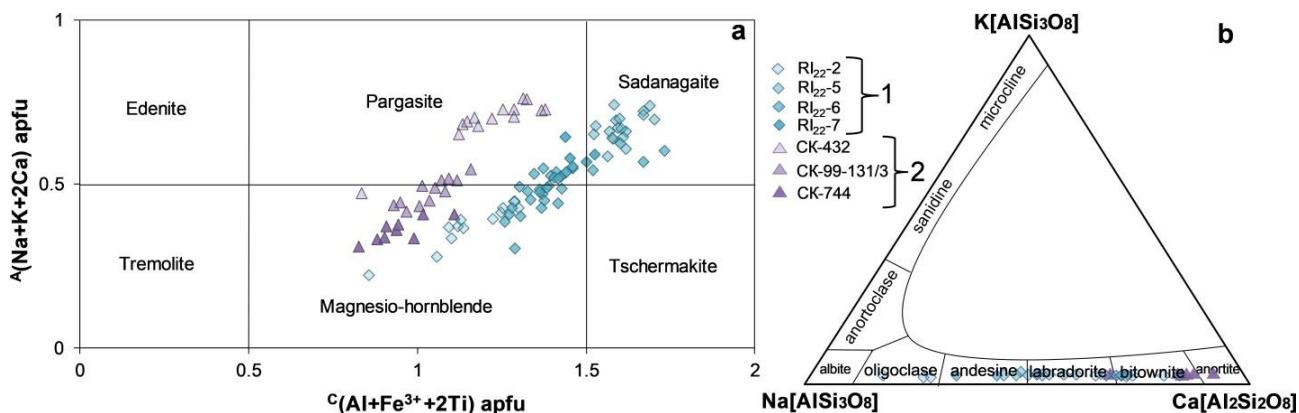


Рис. 3. Классификационные диаграммы для амфибола (а) по [13] и плагиоклаза (б) по [14] из амфиболитов кэршорского (1) и сухолядского (2) комплексов.

[Fig. 3. Classification diagrams for amphibole (a) according to [13] and plagioclase (b) according to [14] from amphibolites of the Kaershore (1) and Sukholyad (2) complexes.]

Плагиоклаз – второй по распространённости минерал (за исключением лейкосом и плагиоклазитовых жил, где он доминирует). Зёрна таблитчатые и призматические, иногда ксеноморфные, их длина обычно варьирует в пределах 1–5 мм. В амфиболитах сухолядского комплекса плагиоклаз сильно изменён и превращён в соссюритовую массу. В кэршорских амфиболитах плагиоклаз варьирует по составу от битовнита до олигоклаза, в сухолядском комплексе плагиоклаз изучен лишь в одном образце (СК744), где он варьирует от анортита до лабрадора (рис. 3б).

Среди акцессорных минералов кэршорских амфиболитов отмечены апатит, титанит, ильменит, магнетит, калиевый полевой шпат, рутил, халькопирит, пирит, халькозин. В амфиболитах сухолядского комплекса обнаружены: гранат, клинопироксен, титанит, ильменит, пирротин, пирит (окисленный), халькопирит, пентландит, халькозин, барит, кубанит. Часть из

них, очевидно, имеет постметаморфическую природу. В отдельных образцах амфиболитов сухолядского комплекса (например, обр. СК432, СК98-55) широко развит титанит, достигающий 10 об. %.

Апатит является одним из важнейших индикаторных акцессорных минералов в породах разного генезиса [15]. По уровню концентраций примесных элементов (S, Al, Si, Fe, Sr) апатиты из всех проб в целом близки. Содержания SrO достигают 0.7 мас. %, FeO – 1.9 %, SO₃ – 0.6 %, однако количество серы непостоянно и чаще ниже предела обнаружения ЭДС. По содержанию F и Cl – важнейших агентов флюидно-магматического и флюидно-метасоматического рудообразования мы выделили три группы апатитов: 1) высокохлористые (обр. СК 744), 2) высокофтористые (обр. СК 432, RI₂₂-6) и 3) низкохлористые и низкофтористые (обр. RI₂₂-2, RI₂₂-5 и RI₂₂-7). В первой группе Cl/F отношение в среднем составляет 1.8, во второй Cl/F=0.03–0.13, в третьей

Cl/F=0.1–0.5.

В амфиболитах, особенно сухолядских, широко распространены эпидот (иногда пистацит), клиноцизит, хлорит, пумпеллиит, заместившие плагиоклаз и даже амфибол. Часто они развиты в жильных агрегатах, рассекающих основную массу. Также из низкотемпературных минералов в незначительном количестве отмечены альбит, гётит, мусковит, малахит.

Геохимия

В табл. 1 даны составы представительных образцов амфиболитов. На TAS-диаграмме амфиболиты кэршорского и сухолядского комплексов образуют непрерывный линейный тренд от габбро до диорита нормальной щёлочности (рис. 4а). Согласно петрографическим наблюдениям, более кислый состав имеют: 1) более изменённые породы в условиях низкотемпературного метасоматоза (пропилитовой фации, реже аргиллизитовой) и возможно метаморфизма (зеленосланцевой фации); 2) породы, содержащие метатерригенный материал (например, обр. СК99-154). На диаграмме А. Миаширо (рис. 4б) амфиболиты распределя-

ются по границе толеитов и известково-щелочных пород, при этом не образуя чётких трендов. На вариационных диаграммах, построенных по индексу магнезиальности (рис. 4с, д), также не наблюдается отчётливых трендов. Породы кэршорского комплекса ясно подразделяются на две группы по глинозёмистости, отношение $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ в амфиболитах сильно варьирует. Величина магнезиальности $\text{Mg}^{\#}$ ($\text{X}_{\text{MgO}}/(\text{X}_{\text{MgO}} + \text{X}_{\text{FeO}})$) в кэршорских амфиболитах варьирует от 0.43 до 0.71 (среднее 0.52), а в сухолядских – от 0.46 до 0.76 (в среднем 0.57). Такие вариации в основном обусловлены количественными соотношениями амфибала и плагиоклаза в породах. Роговообманковые долериты из даек, секущих амфиболитовые блоки сухолядского комплекса, имеют промежуточные составы и петрохимические индексы ($\text{Mg}^{\#}=0.51–0.57$). В целом изученные породы имеют низкие содержания TiO_2 (0.2–1.3, в среднем 0.7 мас. %), исключением являются три пробы сухолядских амфиболитов (СК432, СК98-55 и СК98-92/1) с высоким содержанием TiO_2 – 3.2, 2.5 и 2.3 мас. % соответственно. Эти образцы обогащены титанитом (постметаморфическим?).

Табл. 1. Химический состав амфиболитов кэршорского и сухолядского комплексов
[Table 1. Chemical composition of amphibolites from the Kaershore and Sukholyad complexes]

Петрогенные оксиды в мас. % [Major elements in wt. %]										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Кэршорский к-с [Kaershore com.]					Сухолядский комплекс [Sukholyad complex]					
Element	RI ₂₂ -2	RI ₂₂ -6	RI ₂₂ -10	RI ₂₂ -11	CK432	CK503/1	CK98-75/1	CK98-93/1	CK99-127/1	CK99-131/3
SiO ₂	51.67	47.39	55.26	50.62	46.62	48.18	51.63	50.71	50.62	48.78
TiO ₂	0.66	0.61	0.57	0.98	3.18	0.92	0.81	0.81	0.76	0.87
Al ₂ O ₃	11.46	16.79	17.44	10.90	15.30	15.64	12.71	15.11	13.89	16.52
Fe ₂ O ₃ ^t	15.01	14.50	8.71	10.39	8.55	8.46	11.09	6.36	12.10	11.39
MnO	0.27	0.29	0.13	0.12	0.13	0.09	0.17	0.09	0.21	0.09
CaO	11.43	11.89	7.89	12.85	14.50	12.58	10.81	11.64	10.38	11.31
MgO	6.12	5.41	3.97	12.59	6.08	10.85	8.31	10.29	8.14	5.78
Na ₂ O	1.70	1.81	3.03	1.24	1.33	1.29	1.65	1.04	1.28	1.71
K ₂ O	0.10	0.05	0.74	0.21	0.51	0.13	0.61	0.08	0.23	0.17
P ₂ O ₅	0.25	0.27	0.27	<0.1	0.66	0.12	0.14	<0.1	<0.1	0.11
S	0.14	0.05	<0.01	0.02	<0.01	0.08	0.17	0.07	0.02	0.09
LOI	0.77	1.16	2.11	0.35	3.43	2.02	2.26	3.62	2.57	3.18
Total	99.59	100.23	100.13	100.28	100.29	100.36	100.35	99.83	100.19	100.02
Микроэлементы в г/т [Trace elements in ppm]										
Li	1.9	3.1	6.9	2.7	1.0	1.4	3.7	1.3	1.2	2.6
Be	0.4	0.3	0.8	0.6	0.9	0.1	1.8	0.1	0.3	0.3
Sc	59	41	25	41	33	96	23	68	51	34
V	456	389	250	311	233	566	199	379	347	578
Cr	78	43	40	57	126	80	187	66	45	12
Co	48	34	26	30	30	42	42	33	36	38
Ni	21	15.3	14.5	16.3	105	41	96	39	22	23
Cu	115	29	218	63	43	271	46	31	219	302
Zn	58	54	50	41	33	15.8	114	11.2	34	25
Ga	3.3	3.6	5.1	3.6	5.6	3.0	5.6	2.8	3.6	4.4
Rb	0.8	0.7	14.6	0.7	4.7	1.0	4.5	0.9	2.2	1.6
Sr	512	851	895	647	861	407	331	553	571	1079
Y	14	14.5	11	18	41	13	35	10	16	10
Zr	9.5	5.2	12.8	17	48	7.4	204	7.7	20	13.5
Nb	0.29	0.57	0.92	1.6	21	0.51	24	0.69	1.4	0.64
Cs	1.60	0.62	1.13	0.05	0.27	0.63	1.80	0.78	1.06	0.79

Продолжение табл. 1
[Continued Table 1]

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ba	49	39	172	68	174	71	319	31	99	119
La	5.20	3.70	9.60	8.40	18.10	0.83	25.00	1.50	3.40	3.20
Ce	12.10	9.80	20.00	17.00	42.00	2.50	47.00	2.90	9.10	6.20
Pr	1.90	1.70	2.60	3.30	7.60	0.50	7.60	0.52	1.50	0.93
Nd	8.30	8.00	10.50	13.30	32.00	2.90	27.00	2.30	6.60	3.70
Sm	2.50	2.70	2.50	3.40	9.40	1.30	7.40	1.02	2.10	1.30
Eu	0.84	0.96	0.89	0.90	0.27	0.52	2.40	0.45	0.68	0.48
Gd	2.10	2.20	1.90	2.60	8.30	1.50	6.60	1.10	2.00	1.30
Tb	0.38	0.38	0.32	0.45	1.50	0.33	1.18	0.22	0.40	0.23
Dy	2.10	2.20	1.60	2.50	7.50	2.00	6.10	1.40	2.20	1.30
Ho	0.48	0.50	0.37	0.58	1.60	0.46	1.30	0.34	0.55	0.32
Er	1.40	1.50	1.07	1.70	4.10	1.30	3.40	0.89	1.60	0.85
Tm	0.20	0.20	0.15	0.26	0.53	0.16	0.41	0.12	0.22	0.11
Yb	1.70	1.70	1.30	2.30	4.10	1.30	3.60	0.94	1.90	0.96
Lu	0.23	0.22	0.18	0.28	0.51	0.15	0.43	0.11	0.24	0.11
Hf	0.32	0.21	0.44	0.70	1.80	0.31	4.90	0.25	0.69	0.35
Ta	0.03	0.02	0.02	0.02	1.70	0.04	1.70	0.03	0.02	0.03
Pb	2.60	1.90	5.70	1.90	1.30	1.30	2.70	1.40	2.00	1.90
Th	0.07	0.04	0.41	0.16	0.75	0.03	3.00	0.13	0.15	0.13
U	0.04	0.03	0.39	0.07	0.16	0.01	0.68	0.05	0.09	0.06

Продолжение табл. 1
[Continued Table 1]

1	12	13	14	15	16	17	18	19
Сухолядский комплекс [Sukholyad complex]								
Element	CK505	CK744	CK98-55	CK98-59/1	CK99-154	CK99-161/2	CK99-126/2*	CK99-129*
SiO ₂	57.25	53.49	51.68	52.54	58.32	55.38	57.04	54.26
TiO ₂	0.70	0.64	2.46	0.66	0.63	0.78	0.81	0.70
Al ₂ O ₃	11.88	12.34	12.89	16.96	14.90	14.92	11.94	14.23
Fe ₂ O ₃ ^t	10.43	10.50	6.97	10.55	8.95	10.76	11.38	10.50
MnO	0.17	0.19	0.11	0.19	0.19	0.19	0.18	0.18
CaO	8.31	12.55	18.25	8.99	6.37	6.58	7.51	9.36
MgO	6.41	6.90	3.01	4.93	4.71	5.29	5.95	6.68
Na ₂ O	2.96	1.68	2.06	2.71	2.96	2.76	2.43	2.18
K ₂ O	0.10	0.15	0.10	0.36	1.00	0.86	0.21	0.14
P ₂ O ₅	<0.1	<0.1	0.63	0.18	0.24	0.21	<0.1	<0.1
S	0.07	0.11	<0.01	0.03	0.06	0.06	0.11	0.01
LOI	1.82	1.61	2.00	2.33	2.11	2.06	2.35	1.83
Total	100.10	100.15	100.16	100.43	100.43	99.86	99.90	100.06
Микроэлементы в г/т [Trace elements in ppm]								
Li	0.76	6.9	1.6	1.6	2.3	2	1.7	2.6
Be	0.43	0.28	0.66	0.36	0.89	0.68	0.41	0.41
Sc	35	40	38	44	24	34	44	41
V	232	239	291	296	201	248	304	260
Cr	115	60	32	188	14.4	31	104	120
Co	35	45	30	39	23	30	44	37
Ni	33	31	15.4	36	13.7	21	37	68
Cu	93	111	86	98	48	83	147	69
Zn	29	34	38	39	73	220	42	32
Ga	2.9	3.1	4.7	5.1	5.9	5.7	5.3	4
Rb	0.85	2.7	2.5	8.2	13.3	12.6	5.6	2
Sr	218	271	567	563	303	420	331	158
Y	19	20	16.8	22	16.2	21	22	18.7
Zr	34	30	16.3	28	18.6	16.1	50	38
Nb	2.1	1.4	1.6	1.3	10.3	5.1	1.2	1.5

Продолжение табл. 1
[Continued Table 1]

1	12	13	14	15	16	17	18	19
Cs	0.68	0.68	1.15	1.11	1.04	0.48	0.57	1.18
Ba	52	55	161	175	223	223	215	131
La	5.9	4.1	9.8	3.3	12.3	13.4	4.1	4.3
Ce	13.1	10.6	19	9.2	19	20	9.4	9.6
Pr	1.8	1.7	2.6	1.6	3.1	3.4	1.5	1.4
Nd	7.5	6.9	9.3	6.7	11.1	12.4	6.2	5.8
Sm	2.5	2.3	2.5	2.4	2.7	3.1	2.3	2.1
Eu	0.79	0.77	0.82	0.78	0.044	0.015	0.83	0.72
Gd	2.4	2.2	2.1	2.4	2.2	2.7	2.5	2.2
Tb	0.49	0.46	0.4	0.5	0.38	0.51	0.53	0.46
Dy	2.9	2.8	2.2	2.9	2.1	2.8	3.2	2.8
Ho	0.71	0.68	0.55	0.73	0.52	0.68	0.8	0.7
Er	2.1	1.9	1.5	2	1.5	2	2.2	2
Tm	0.3	0.26	0.2	0.28	0.21	0.26	0.31	0.26
Yb	2.4	2.3	1.9	2.5	1.8	2.3	2.8	2.4
Lu	0.33	0.29	0.25	0.32	0.24	0.3	0.37	0.31
Hf	1	0.86	0.48	0.84	0.66	0.71	1.4	1.1
Ta	0.038	0.064	0.086	0.024	1.18	0.51	0.039	0.056
Pb	1.1	1.21	4.7	3	4.2	7.3	1.8	1.6
Th	0.44	0.102	0.37	0.106	2	2.7	0.66	0.59
U	0.18	0.047	0.16	0.07	0.6	0.98	0.29	0.21

Примечание: *долериты в амфиболитах.

[Note: *dolerites in amphibolites.]

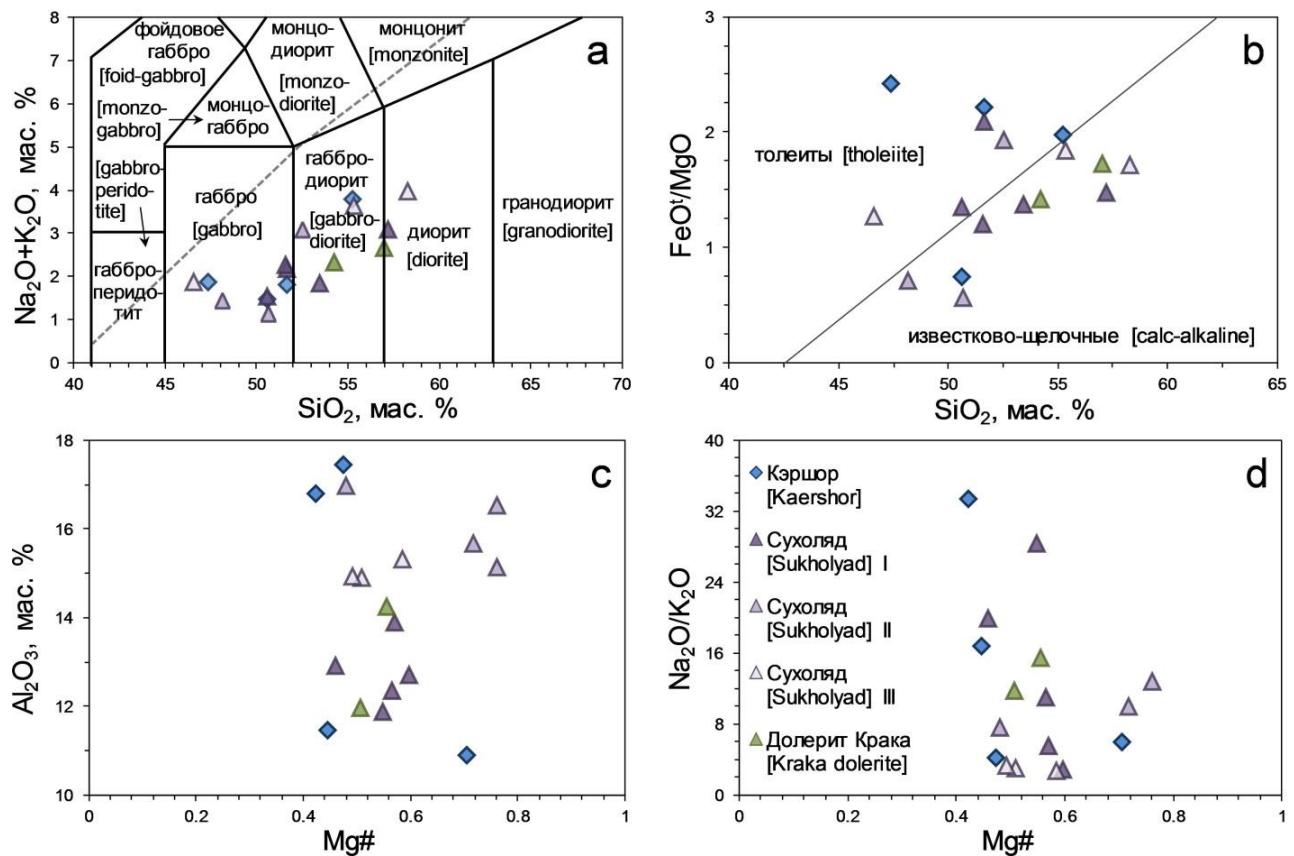


Рис. 4. (a) TAS-диаграмма по [16]; (b) Диаграмма SiO_2 – FeO/MgO , пунктирная линия, разделяющая толеитовые и известково-щелочные породы, проведена по [17]; (c) диаграмма $\text{Mg}\#$ – Al_2O_3 , мас. %; (d) диаграмма $\text{Mg}\#$ – $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$.

[Fig. 4. (a) TAS-diagram after [16]; (b) SiO_2 – FeO/MgO diagram, the dashed line separating tholeiitic and calc-alkaline rocks is after [17]; (c) $\text{Mg}\#$ – Al_2O_3 , wt. % diagram; (d) $\text{Mg}\#$ – $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ diagram.]

Микроэлементный состав амфиболитов кэршорского комплекса сравнительно однороден, тогда как породы сухолянского комплекса геохимически изменчивы. На мультиэлементных диаграммах выделяются три геохимических типа (рис. 5). На диаграмме распределения редкоземельных элементов – REE (рис. 5а) спектры I типа близки к островодужным известково-щелочным базальтоидам ($\text{La}_N/\text{Yb}_N=1.21-5.03$, $\text{La}_N/\text{Gd}_N=1.43-4.30$, $\text{Eu}/\text{Eu}^*=0.92-1.24$), а II тип более характерен для толеитов MORB-типа (т.е. базальтов срединно-океанических хребтов) с $\text{La}_N/\text{Yb}_N=0.43-1.09$, $\text{La}_N/\text{Gd}_N=0.49-1.17$, $\text{Eu}/\text{Eu}^*=0.99-1.29$. От них резко отличается III геохимический тип амфиболитов с $\text{La}_N/\text{Yb}_N=3.01-4.65$, $\text{La}_N/\text{Gd}_N=1.86-4.76$ и “глубокой” отрицательной европиевой

аномалией – $\text{Eu}/\text{Eu}^*=0.02-0.09$. Эти же три геохимических типа так же хорошо различаются на диаграмме распределения редких и рассеянных элементов – RSE (рис. 5б). Первые два типа сходны по высокой концентрации крупноионных лиофильных элементов (Rb, Sr, K) и низкой – высокозарядных (Nb, Ta, Th, Y, REE, Ti). При этом II тип отличается пониженным содержанием всех примесных элементов (рис. 5). III геохимический тип отличается довольно высокими содержаниями и крупноионных лиофильных, и высокозарядных элементов, в т. ч. Nb, Ta, Th, U, Sr (рис. 5б). На бинарных диаграммах (рис. 4с, д) эти три типа также образуют обособленные тренды или рои. Все пробы амфиболитов кэршорского комплекса отнесены к I геохимическому типу.

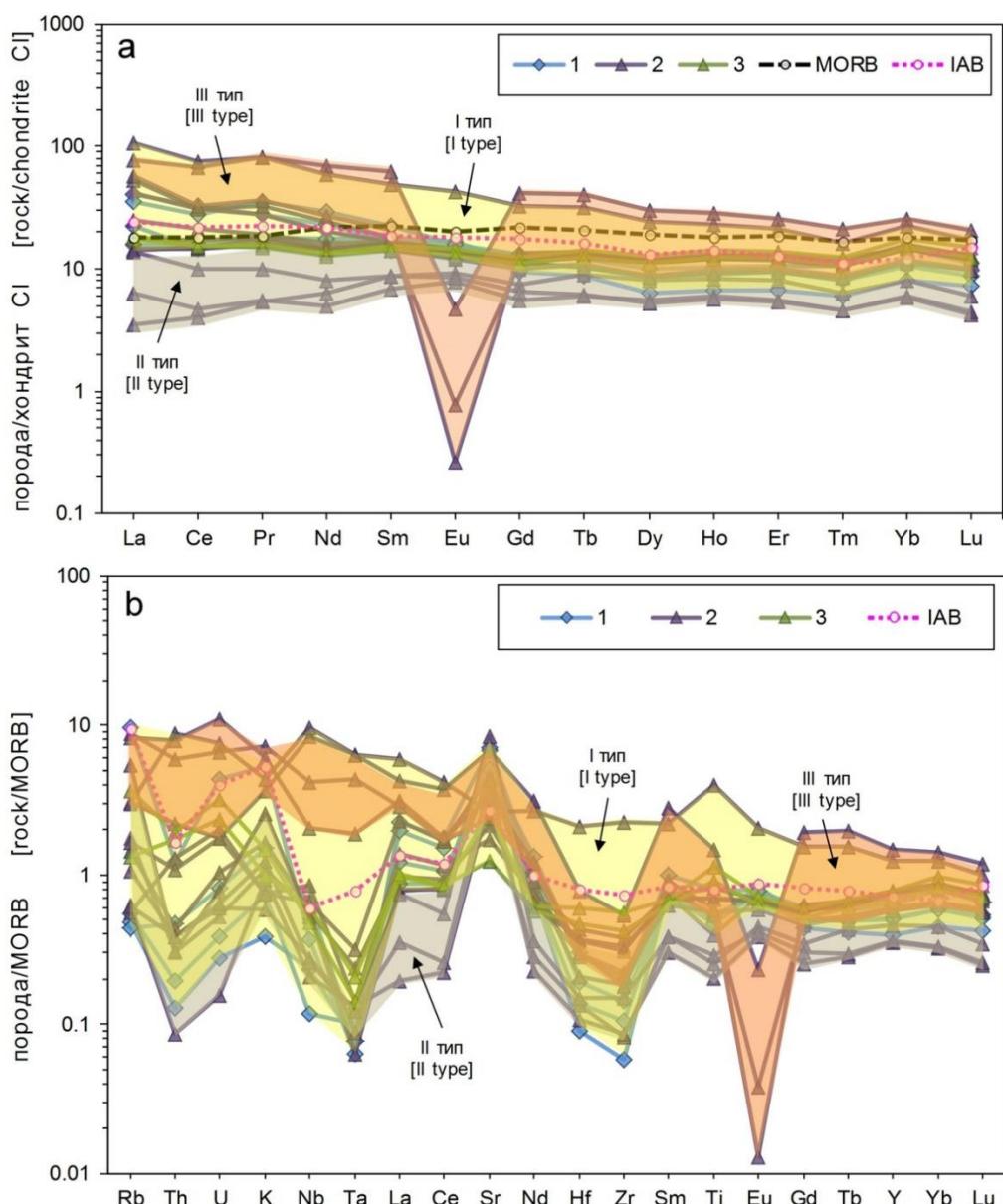


Рис. 5. Спектры нормированного распределения редкоземельных (а) и редких и рассеянных (б) элементов в амфиболитах кэршорского (1) и сухолянского (2 – амфиболиты, 3 – роговообманковые долериты, секущие амфиболиты) комплексов. IAB – базальт островной дуги, MORB – базальт срединно-океанического хребта. Состав хондрита взят из [18], составы IAB и MORB взяты из [19].

[Fig. 5. Normalized rare earth (a) and rare and scattered (b) element patterns for amphibolites from the Kaershore (1) and Sukholyad (2) – amphibolites, (3) – hornblende dolerites) complexes. IAB – island arc basalt, MORB – middle ocean ridge basalt. Chondrite composition taken from [18], IAB and MORB compositions taken from [19].]

Обсуждение результатов Протолиты амфиболитов кэршорского и сухолядского комплексов

Офиолиты, обнажённые в складчатых областях, по геохимическим критериям разделяются на надсубдукционные (SSZ-related) и несвязанные с субдукцией (Subduction-unrelated) [20]. Геохимическая интерпретация первых более сложна в связи с тем, что они включают преддуговые, задуговые, “гибридные” типы, а также непосредственно офиолиты вулканических дуг. Согласно [21] формирование Кракинского офиолитового массива происходило в обстановке окраинно-континентального рифтогенеза, т.е. отвечает типу, несвязанному с субдукцией. Также существует мнение, что массивы Крака являются субконтинентальными гипербазитами, т.е. не относятся к офиолитам [22]. В отношении Рай-Изского офиолитового массива популярно представление о его субдукционном происхождении [23].

На происхождение амфиболитов кэршорского комплекса существуют разные взгляды. С. И. Григорьев и Д. Н. Ремизов отнесли их к позднеордовикской офиолитовой ассоциации, более поздней по отношению к вендской райизско-войкарской офиолитовой ассоциации [24]. В.Р. Шмелёвым и Ф.-Ц. Моном на основе геохимических данных к офиолитовой ассоциации отнесены лишь породы так называемой фронтальной зоны, непосредственно примыкающей к гипербазитовому массиву Рай-Из [9]. Амфиболиты, названные ими бластомилонитовыми габбро, из более отдалённой (тыловой) зоны обрамления они считают производными от островодужных амфиболовых габбро и плагиогранитов (постофиолитовая ассоциация). В работе А. Р. Богдановой с коллегами [25] обсуждение протолита ограничено тем, что так называемые габбро-амфиболиты геохимически близки к островодужным базальтам. Амфиболиты сухолядского комплекса, приуроченные к западной части массива Средний Крака, изучены значительно хуже. Их обычно называли габбро-амфиболитами и габброидами, являющимися коровой частью офиолитового разреза [2, 21]. В работе [26] эти породы отнесены к производным от расплавов из верхней мантии, переходной от шпинелевой к плагиоклазовой фации глубинности.

По нашим геохимическим данным амфиболиты кэршорского комплекса сравнительно однородны по составу и близки к базальтам островных дуг. Это видно по спектрам распределения микроэлементов, имеющим те же закономерности, что и средний состав островодужного базальта (рис. 5а, б). На дискриминационных диаграммах точки составов кэршорских амфиболитов попадают в области островодужных базальтоидов (рис. 6б–д). Диаграмма Nb/Yb–Th/Yb (рис. 6а) демонстрирует, что источником магм для протолита амфиболитов могла быть умеренно деплетированная

мантия. Вероятным протолитом для кэршорских амфиболитов были известково-щелочные базиты (габброиды или базальтоиды), возникшие в островодужной обстановке в раннем-среднем палеозое при развитии Войкарской островодужной зоны.

Минералого-геохимические особенности амфиболитов сухолядского комплекса более разнообразны и очевидно связаны с более гетерогенным составом протолита – а именно, с тремя типами субстрата.

I геохимический тип амфиболитов отвечает типичным островодужным базальтам с плавным отрицательным уклоном спектров REE, низкой титанистостью, отрицательной Nb-Ta и положительной Sr-аномалиями (рис. 5а, б). На дискриминационных диаграммах (рис. 6б–д) составы этих амфиболитов попадают в поля базальтоидов островных дуг. Протолит этих амфиболитов аналогичен протолиту кэршорских, при этом диаграмма Nb/Yb–Th/Yb (рис. 6а) показывает, что источник первых был более обогащённым несовместимыми элементами. Вероятный протолит сухолядских амфиболитов I геохимического типа мог быть связан с развитием среднепалеозойской Магнитогорской островодужной зоны.

II геохимический тип амфиболитов по сравнению с предыдущим отличается обеднённостью несовместимыми элементами, что сближает его с базальтами срединно-океанических хребтов (рис. 6а). Однако на дискриминационных диаграммах (рис. 6б–д) составы и этих амфиболитов попадают в поля островодужных базальтоидов. Вероятным объяснением этому служит их связь с толеитами островных дуг, тогда как амфиболиты I геохимического типа принадлежат к производным от известково-щелочных островодужных пород. В связи с этим можно предположить, что протолитом II типа амфиболитов могли быть базиты островной дуги примитивной стадии развития.

III геохимический тип амфиболитов наиболее аутентичен. Он резко отличается от первых двух типов “глубокой” отрицательной европиевой аномалией, отсутствием отрицательной Nb-Ta аномалии и неявной положительной Sr-аномалией на спектрах распределения примесных элементов (рис. 5а, б). При этом все изученные амфиболиты сближают наличие отрицательной Hf-Zr аномалии, обычно сопряжённой с Nb-Ta аномалией в островодужных базальтах. На диаграмме Nb/Yb–Th/Yb (рис. 6а) составы этих амфиболитов указывают на обогащённый источник. На дискриминационных диаграммах они не привязаны к определённым полям и отклоняются от типичных островодужных пород. Все три образца, отнесённые к III геохимическому типу (СК432, СК99-154 и СК99-161/2) отличаются высоким содержанием калия (в среднем 0.8 мас. % K₂O) по сравнению с амфиболитами I и II типов (в среднем 0.4 мас. % K₂O). Примечательно, что амфибол из этих пород (обр. СК432) является наиболее глинозёмистым в сравнении

с амфиболом из других сухолядских образцов. Всё это позволяет предположить, что протолитом для III геохимического типа амфиболитов могла служить вулканогенно-осадочная толща, включающая переслаивание магматических (базальтоидов) и осадочных (песчаных, туфогенных?) пород. Таким образом, эти амфиболиты по вещественному составу близки к параамфиболитам.

Природа сильной отрицательной европиевой аномалии в этих породах пока неясна. Величина Eu/Eu^* не коррелирует с содержанием Sr, поэтому её не объяснить фракционированием плагиоклаза. Вероятное наличие в протолите осадочной составляющей также не может влиять на очень низкую величину Eu/Eu^* , поскольку в большинстве осадков эта величина на порядок выше.

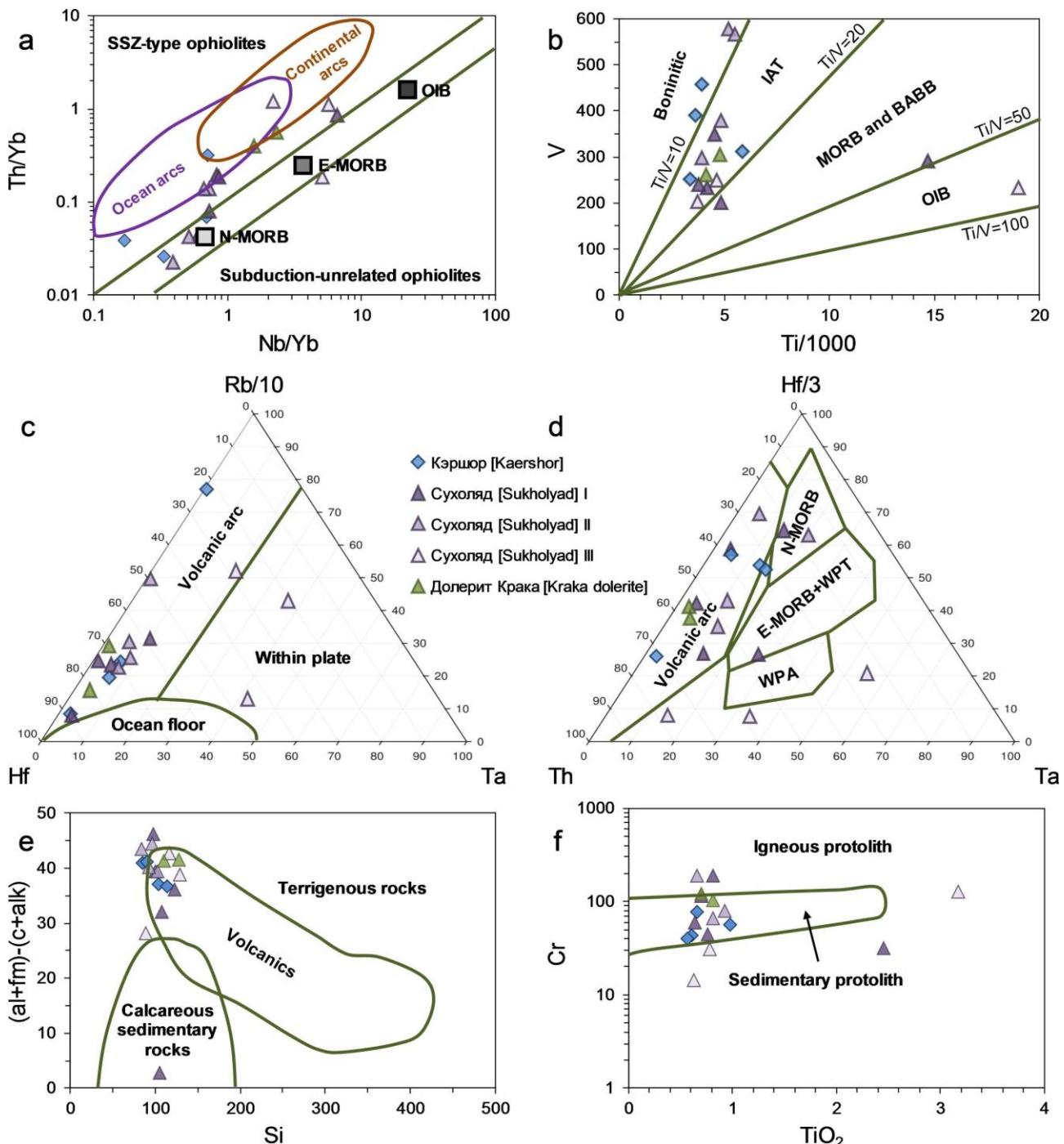


Рис. 6. Дискриминационные геохимические диаграммы Nb/Yb–Th/Yb (a), Ti/1000–V (b) по [27], Rb/10–Hf–Ta (c) по [28], Hf/3–Th–Ta (d) по [29], Si–(al+fm)–(c+alk) [30] (e), TiO₂–Cr [31] (f) для амфиболитов кэршорского и сухолядского комплексов.

[Fig. 6. Discrimination geochemical diagrams Nb/Yb–Th/Yb (a), Ti/1000–V (b) according to [27], Rb/10–Hf–Ta (c) after [28], Hf/3–Th–Ta (d) after [29], Si–(al+fm)–(c+alk) after [30] (e), TiO₂–Cr after [31] (f) for amphibolites of the Kaershor and Sukholjad complexes.]

Дайки долеритов, секущие амфиболиты сухолядского комплекса, по геохимическим характеристикам близки к амфиболитам I геохимического типа и также демонстрируют близость к известково-щелочным базальтам островных дуг.

Геохимические критерии отличия орто- и параамфиболитов не вполне очевидны. Существуют многочисленные (не менее 10) дискриминационные петрохимические диаграммы, разработанные на примерах конкретных метаморфических комплексов орогенов, но, по всей видимости, они не всегда применимы для амфиболитов других регионов. Так, на диаграмме $Si-(al+fm)-(c+alk)$ (рис. 6e), построенной по петрохимическим индексам П. Ниггли, большая часть точек изученных амфиболитов попадает в поле ортоамфиболита (вулканогенный субстрат). А на диаграмме TiO_2-Cr (рис. 6f) значительная часть точек попадает в область параамфиболита. Такие же неопределённости наблюдаются при использовании других диаграмм, популярных в опубликованной литературе. Таким образом, применение указанных дискриминационных диаграмм для определения протолита амфиболитов должно выполняться с большой осторожностью.

РТ-условия кристаллизации амфиболитов

Для определения РТ-условий образования минеральных парагенезисов изученных амфиболитов были применены популярные в научной литературе эмпирические термо- и барометры, успешно апробированные на метаморфических образований. В табл. 2 показаны результаты расчётов по Ti-термобарометру Ю. Ляо и соавторов [32] и амфибол-плагиоклазовому барометру М. Шмидта [33]. По двум образцам амфиболитов кэршорского комплекса получен диапазон температур 673–586 °C и давлений 7.7–4.9 кбар. В сухолядском комплексе рассчитаны РТ-параметры по трём образцам. В обр. СК 744 (I геохимический тип) они составляют 713–673 °C и 4.2–3.2 кбар, в обр. СК99-131/3 (II геохимический тип) – 776–732 и °C и 4.4–2.6 кбар, в СК 432 766–681 °C и 4.9–4.2 кбар. Таким образом, установлено, что амфиболиты кэршорского комплекса образовались при более низких температурах, но более высоких давлениях, чем породы сухолядского комплекса. Согласно РТ-диаграмме [34] породы кэршорского комплекса попадают в область метаморфитов амфиболитовой фации, тогда как породы сухолядского комплекса находятся на границе амфиболитовой и гранулитовой фаций метаморфизма.

Табл. 2. Расчёты РТ-параметров кристаллизации амфиболитов кэршорского и сухолядского комплексов
[Table 2. Calculations of PT parameters of amphibolite crystallization from the Kaershore and Sukholyad complexes]

Sample	RI ₂₂ -2			RI ₂₂ -6			СК 744						СК-99-131/3			СК 432		
	№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
T, °C	627	586	620	634	653	673	690	695	700	673	713	696	762	776	732	766	681	751
P, kbar	7.3	6.1	4.9	7.0	7.7	7.7	3.5	3.6	3.2	3.3	4.2	3.6	2.6	3.8	4.4	4.9	4.7	4.2

Выводы

Полученные результаты минералого-геохимических исследований амфиболитов кэршорского (Полярный Урал) и сухолядского (Южный Урал) комплексов позволили сформулировать следующие выводы:

1. Амфиболиты кэршорского комплекса обнажены на обширной площади в виде непрерывного поля разноразмерных и разноориентированных блоков и имеют чёткий тектонический контакт с гипербазитами, тогда как амфиболиты сухолядского комплекса обнажены слабо в виде хаотичных блоков среди рыхлой массы вместе с фрагментами гипербазитов.

2. Амфиболиты кэршорского комплекса сравнительно однородны по химическому составу, по данным биминеральной геотермобарометрии они образовались при $T=673-586$ °C и $P=7.7-4.9$ кбар, а их геохимические особенности свидетельствуют о происхождении из базитового субстрата, аналогичного известково-щелочным базальтам островной дуги.

3. Амфиболиты сухолядского комплекса образовались при $T=776-681$ °C и $P=4.9-2.6$ кбар, они разнообразны по геохимическим особенностям, что позволило предположить для них три вида протолита: 1) известково-щелочные базиты островной дуги (аналогично кэршорским), 2) толеитовые базиты островной дуги и 3) вулканогенно-осадочные (туфогенные) породы

островной дуги.

4. Совокупность полученных данных свидетельствует о том, что амфиболиты могут являться частями офиолитовых ассоциаций надсубдукционного типа.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Д. Е. Савельеву за предоставленные образцы сухолядского комплекса (Средний Крака) и активное обсуждение. Авторы признательны рецензенту К. А. Савко за полезные критические замечания, позволившие значительно улучшить качество рукописи.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

- Ефимов А. А. Габбро-гипербазитовые комплексы Урала и проблема офиолитов. М: Наука, 1984. 232 с.
- Савельева Г. Н. Габбро-ультрабазитовые комплексы офиолитов Урала и их аналоги в современной океанической коре. М: Наука, 1987. 245 с.
- Симонов В. А. Петрогенезис офиолитов (термобарогеохимические исследования). Новосибирск: ОИГТМ СО РАН, 1993. 247 с.
- Булыкин Л. Д., Чашухин И. С. Дунит-верлит-клинопик-росенитовые комплексы в альпинотипных гипербазитовых массивах Среднего и Южного Урала. Ежегодник, 2004. С. 114–119.

5. Halder S. K. Chapter 7 – Metamorphic rocks, Introduction to Mineralogy and Petrology (Second Edition) // Elsevier. 2020. P. 269–289.
6. Пучков В. Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогенеза). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.
7. Вахрушева Н. В., Ширяев П. Б., Степанов А. Е., Богданова А. Р. Петрология и хромитоносность ультраосновного массива Рай-Из (Полярный Урал). Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2017. 265 с.
8. Ремизов Д. Н., Григорьев С. И., Петров С. Ю., Косьянов А. О., Носиков М. В., Сергеев С. А. Новые данные о возрасте габброидов Кэршорского комплекса на Полярном Урале // Доклады Академии наук. 2010. Т. 434. № 2. С. 238–242
9. Шмелев В. Р., Мон Ф. Природа и возраст базитов оphiолитового массива Рай-Из (Полярный Урал) // Доклады Академии наук. 2013. Т. 451. № 2. С. 211–215
10. Ронкин, Ю. Л., Чащухин И.С., Пучков В.Н. Шпинелевые лерцолиты массива Северный Крака (Ю. Урал): первые REE ID-ICP-MS, ^{87}Sr - ^{86}Sr и ^{147}Sm - ^{143}Nd AL ID-TIMS-изотопные ограничения // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2024. Т. 514. № 1. С. 77–88. DOI: 10.31857/S2686739724010092.
11. Краснобаев А. А., Русин А. И., Русин И. А., Бушарина С. В. Цирконы, цирконовая геохронология и вопросы петрогенеза лерцолитовых массивов Южного Урала // Геохимия. 2011. № 5. С. 506–522
12. Савельев Д. Е., Белогуб Е. В., Зайков В. В., Сначёв В. И., Котляров В. А., Блинов И. А. Первые проявления платинометальной минерализации в ультрамафитах массива Средний Крака (Южный Урал) // Доклады Академии наук. 2015. Т. 460. № 5. С. 566–569
13. Hawthorne F. C., Oberti R., Harlow G. E., Maresh W. V., Martin R. F., Schumacher J. C., Welch M. D. Nomenclature of the amphibole supergroup // American Mineralogist. 2012. Vol. 97. P. 2031–2048
14. Deer W. A., Howie R., Zussman J. An Introduction to the Rock-Forming Minerals, 2nd ed.; Pearson Education Limited: London, UK, 1992; P. 1–712
15. Холоднов В. В., Бушляков И. И. Галогены в эндогенном рудообразовании. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 394 с.
16. Middlemost EAK Naming materials in the magma/igneous rock system // Earth-Science Reviews. 1994. Vol. 37. P. 215–24
17. Miyashiro A. Volcanic Rock Series in Island Arcs and Active Continental Margins // American Journal of Science. 1974. Vol. 274. P. 321–355
18. Lyubetskaya T., Korenaga J. Chemical composition of earth's primitive mantle and its variance // Journal of geophysical research. 2007. Vol. 112. P. 1–21. DOI: <https://doi.org/10.1029/2005JB004224>
19. Наумов В. Б., Коваленко В. И., Дорофеева В. А., Гирнис А. В., Ярмолюк В. В. Средний состав магматических расплавов главных геодинамических обстановок по данным изучения расплавных включений в минералах и закалочных стекол // Геохимия. 2010. № 12. С. 1266–1288
20. Furnes H., Dilek Y., Guochun Z., Safonova I., Santosh M. Geochemical characterization of ophiolites in the Alpine-Himalayan Orogenic Belt: Magmatically and tectonically diverse evolution of the Mesozoic Neotethyan oceanic crust // Earth Sci. Rev. 2020. Vol. 208. 103258 <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103258>
21. Сначёв В. И., Савельев Д. Е., Рыкус М. В. Петрогохимические особенности пород и руд габбро-гипербазитовых массивов Крака. Уфа, 2001. 212 с.
22. Чащухин И. С., Уймин С. Г. О редокс-условиях становления ультрамафитов складчатых областей (на примере Урала). Труды Института геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварецкого. 1997. № 144. С. 86–89
23. Шмелев В. Р. Мантийные ультрабазиты оphiолитовых комплексов Полярного Урала: петрогенезис и обстановка формирования // Петрология. 2011. Т. 19. № 6. С. 649–672
24. Григорьев С. И., Ремизов Д. Н. Кэршорский габброидный комплекс и проблема оphiолитов Полярного Урала. Магматизм и метаморфизм в истории Земли: материалы совещания. Екатеринбург: Институт геологии и геохимии УрО РАН. 2010. С. 191–192
25. Богданова А. Р., Вахрушева Н. В., Ширяев П. Б. Амфиболиты ультрамафитового массива Рай-Из (Полярный Урал) // Металлогенезия древних и современных океанов. 2022. С. 175–180
26. Савельев Д. Е., Сначёв В. И., Романовская М. А. Новые данные по геохимии пород полосчатого комплекса массива Средний Крака (Южный Урал) // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2000. № 6. С. 32–40
27. Pearce J. A. Immobile elements fingerprinting of ophiolites // Elements. 2014. Vol. 10 (2). P. 101–108
28. Harris N. B., Pearce J. A., Tindle A. G. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism // J. Geol. Soc. Spec. Publ. 1986. Vol. 19. P. 67–81
29. Wood D.A. 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. 1980. Vol. 50. P. 11–30
30. Simonen A. Stratigraphy and sedimentation of the Svecofennidic, early Archean supracrustal rocks in southwestern Finland // Bulletin de la Commission Géologique de Finlande. 1953. Vol. 160. P. 64
31. Leake B. E. The chemical distinction between ortho- and para-amphibolites // J. Petrol. 1964. Vol. 5. P. 238–254
32. Liao Y., Wei C., Rehman H. U. Titanium in calcium amphibole: Behavior and thermometry // American Mineralogist. 2021. Vol. 106 (2). P. 180–191. <https://doi.org/10.2138/am-2020-7409>
33. Schmidt M. W. Amphibole Composition in Tonalite as a Function of Pressure: An Experimental Calibration of the Al-in-Hornblende Barometer // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1992. Vol. 110. P. 304–310. <https://doi.org/10.1007/BF00310745>
34. Yardley B. W. An introduction to metamorphic petrology // Longman Earth Sci. Series. 1989. 248 p.

Geochemistry of amphibolites associated with ophiolite massifs of the Urals (on the example of Rai-Is and Middle Kraka) as a key to unravelling of their origin

©2024 I. R. Rakhimov[✉], A. A. Samigullin

Institute of Geology, 16/2 Karl Marx st., 450077, Ufa, Russian Federation

Abstract

Introduction: amphibolites often occurs within the framework of ophiolite massifs, but their relationship is not always clear. In order to clarify their source and conditions of formation, we carried out mineralogical and geochemical studies of amphibolites from the Kaershore (Polar Urals) and Sukholyad (Southern Urals) complexes, confined to the Rai-Iz and Middle Kraka ophiolite massifs, respectively.

Methodology: petrographic and mineralogical studies were carried out using optical (Altami Polar 3) and scanning electron (Tescan Vega Compact) microscopy. The chemical composition of the rocks was determined using X-ray fluorescence analysis (X-Calibur) and inductively coupled plasma mass spectrometry (Agilent 7500cx).

Results and discussion: amphibolites are most characterized by a gneissic structure and nematograno-blastic texture, and the main mineral amphibole corresponds to magnesiohornblendite, sadanagaite and pargasite. The amphibolites of the Kaershore complex are relatively homogeneous in geochemistry and according to geothermobarometry of amphibole and plagioclase were formed at $T = 673-581$ °C and $P = 7.7-4.9$ kbar. The amphibolites of the Sukholyad complex were formed at $=776-681$ °C and $P=4.9-2.6$ kbar; they are diverse in geochemical features, which made it possible to suggest three types of protolith.

Conclusions: the geochemical features of the Kaershore amphibolites indicate their origin from a basic source similar to the island arc calc-alkaline basalt. The following types of protoliths have been proposed for the Sukholyad amphibolites: 1) calc-alkaline island arc basites, 2) island arc tholeiitic basites, and 3) volcanic-sedimentary rocks of the island arc. The totality of the obtained mineralogical and geochemical data indicates that amphibolites may be parts of ophiolite associations of the suprasubduction (SSZ) type.

Keywords: Urals, ophiolites, amphibolite, island arc basalts, geochemistry, thermobarometry.

Funding: The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-17-00019.

For citation: Rakhimov I. R., Samigullin A. A. Geochemistry of amphibolites associated with ophiolite massifs of the Urals (using the example of Rai-Is and Middle Kraka) as a key to unravelling of their origin // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Geologija – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2024, no. 4, pp. 35–50. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/4/35-50>

Conflict of interests: The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

[✉] Ildar R. Rakhimov, e-mail: rigel92@mail.ru

REFERENCES

1. Efimov A. A. *Gabbro-giperbazitovye kompleksy Urala i problema ofiolitov* [Gabbro-giperbasic complexes of the Urals and problems of ophiolites]. Moscow, Nauka publ., 1984, 232 p. (In Russ.)
2. Savel'eva G. N. *Gabbro-ul'trabazitovye kompleksy ofiolitov Urala i ih analogi v sovremennoj okeanicheskoy kore* [Gabbro-ultramafic complexes of Ural ophiolites and their analogues in the modern oceanic crust]. Moscow, Nauka publ., 1987, 245 p. (In Russ.)
3. Simonov V. A. *Petrogenetis ofiolitov (termobarogeohimicheskie issledovaniya)* [Petrogenesis of ophiolites (thermobarogeochimical studies)]. Novosibirsk, OIGGM SO RAN publ., 1993, 247 p. (In Russ.)
4. Bulykin L. D., Chashchuhin I. S. *Dunit-verlit-klinopikrosenitovye kompleksy v al'pinotipnyh giperbazitovyh massivah Srednego i Yuzhnogo Urala* [Dunite-werlite-clinopicrosenitic complexes in alpine-type ultramafic massifs of the Middle and Southern Urals]. Ezhegodnik publ., 2004, pp. 114–119 (In Russ.)
5. Haldar S. K. Chapter 7 - Metamorphic rocks, Introduction to Mineralogy and Petrology (Second Edition). Elsevier, 2020, pp. 269–289.
6. Puchkov V. N. *Geologiya Urala i Priural'ya (aktual'nye voprosy stratigrafi, tektoniki, geodinamiki i metallogenii)* [Geology of the Urals and the Cis-Urals (current issues of stratigraphy, tectonics, geodynamics and metallogeny)] Ufa, Poligraf Servis publ., 2010, 280 p. (In Russ.)
7. Vahrusheva N. V., Shiryaev P. B., Stepanov A. E., Bogdanova A. R. *Petrologiya i hromitonosnost' ul'traosnovnogo massiva Raj-Iz (Polyarnyj Ural)* [Petrology and chromite content of the Ray-Iz ultramafic massif (Polar Urals)]. Ekaterinburg, IGG UrO RAN publ., 2017, 265 p. (In Russ.)
8. Remizov D. N., Grigor'ev S. I., Petrov S. Yu., Kos'yanov A. O., Nosikov M. V., Sergeev S. A. Novye dannye o vozraste gabbroidov Kershorskogo kompleksa na Polyarnom Urale [New data on the age of gabbroids of the Kershor complex on the Polar Urals]. *Doklady Akademii nauk – Reports of the Academy of Sciences*, 2010, vol. 434, no. 2, pp. 238–242 (In Russ.)
9. Shmelev V. R., Mon F.. Priroda i vozrast bazitov ofiolitovogo massiva Raj-Iz (Polyarnyj Ural) [Nature and age of basites of the Ray-Iz ophiolite massif (Polar Urals)]. *Doklady Akademii nauk – Reports of the Academy of Sciences*, 2013, vol. 451, no. 2, pp. 211–215 (In Russ.)
10. Ronkin Yu. L., Chashchuhin I. S., Puchkov V. N. *Shpinelevye lercolity massiva Severnyj Kraka (Yu. Ural): pervye REE ID-ICP-MS, ⁸⁷Sr-⁸⁶Sr i ¹⁴⁷Sm-¹⁴³Nd AL ID-TIMS-izotopnye ogranicheniya* [Spinel lherzolites of the Northern Kraka massif (Southern Urals): the first REE ID-ICP-MS, ⁸⁷Sr-⁸⁶Sr and ¹⁴⁷Sm-¹⁴³Nd AL ID-TIMS isotope constraints]. *Doklady Rossijskoy akademii nauk. Nauki o Zemle – Reports of the Russian Academy of Sciences. Earth Sciences.*, 2024, vol. 514, no. 1, pp. 77–88. DOI 10.31857/S2686739724010092. (In Russ.)
11. Krasnobaev A. A., Rusin A. I., Rusin I. A., Busharina S. V. Cirkony, cirkonovaya geochronologiya i voprosy petrogenetisza lercolitovyh massivov Yuzhnogo Urala [Zircons, zircon geochronology and petrogenesis of lherzolite massifs in the Southern Urals]. *Geohimiya – Geochemistry*, 2011, no. 5. pp. 506–522 (In Russ.)
12. Savel'ev D. E., Belogub E. V., Zajkov V. V., Snachyov V. I., Kotlyarov V. A., Blinov I. A. Pervye proyavleniya platino-metal'noj mineralizacii v ul'tramafitah massiva Srednj Kraka (Yuzhnyj Ural) [First manifestations of platinum-metal mineralization in ultramafites of the Sredniy Kraka massif (Southern Urals)]. *Doklady Akademii nauk – Reports of the Academy of Sciences*, 2015, vol. 460, no. 5, pp. 566–569 (In Russ.)
13. Hawthorne F. C., Oberti R., Harlow G. E., Maresh W. V., Martin R. F., Schumacher J. C., Welch M. D. Nomenclature of the amphibole supergroup. *American Mineralogist*, 2012, vol. 97, pp. 2031–2048.
14. Deer W. A.; Howie R.; Zussman J. An Introduction to the Rock—Forming Minerals, 2nd ed.; Pearson Education Limited: London, UK, 1992, pp. 1–712.
15. Holodnov V. V., Bushlyakov I. I. *Galogeny v endogennom rudoobrazovanii* [Halogens in endogenous ore formation]. Ekaterinburg, UrO RAN publ., 2002, 394 p. (In Russ.)
16. Middlemost EAK Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Science Reviews*, 1994, vol. 37, pp. 215–24.
17. Miyashiro A. Volcanic Rock Series in Island Arcs and Active Continental Margins. *American Journal of Science*, 1974, vol. 274, pp. 321–355.
18. Lyubetskaya T., Korenaga J. Chemical composition of earth's primitive mantle and its variance. *Journal of geophysical research*, 2007, vol. 112, pp. 1–21. DOI: <https://doi.org/10.1029/2005JB004224>
19. Naumov V. B., Kovalenko V. I., Dorofeeva V. A., Girnis A. V., Yarmolyuk V. V. *Srednj sostav magmatischeskih rasplavov glavnih geodinamicheskikh obstanovok po dannym izuchenija rasplavnih vklyuchenij v mineralah i zakalochnyh stekol* [Average composition of magmatic melts of the main geodynamic settings according to the study of melt inclusions in minerals and quenched glasses]. *Geohimiya – Geochemistry*, 2010, no. 12, pp. 1266–1288 (In Russ.)
20. Furnes H., Dilek Y., Guochun Z., Safonova I., Santosh M.. Geochemical characterization of ophiolites in the Alpine-Himalayan Orogenic Belt: Magmatically and tectonically diverse evolution of the Mesozoic Neotethyan oceanic crust. *Earth Sci. Rev.*, 2020, vol. 208, ar. 103258. doi: 10.1016/j.earscirev.2020.103258
21. Snachyov V. I., Savel'ev D. E., Rykus M. V. *Petrogeohimicheskie osobennosti porod i rud gabbro-giperbazitovyh massivov Kraka* [Petrogeochemical features of rocks and ores of the gabbro-ultramafic massifs of Kraka]. Ufa publ., 2001, 212 p. (In Russ.)
22. Chashchuhin I. S., Ujmin S. G. *O redoks-usloviyah stanovleniya ul'tramafitov skladchatyh oblastej (na primere Urala)* [On the redox conditions of the formation of ultramafites in folded regions (using the Urals as an example)]. *Trudy Instituta geologii i geohimii im. akademika A.N. Zavarickogo* [The work of the Research Institute of Geology and Geochemistry academician A.N. Zavaritsky], 1997, no. 144, pp. 86–89 (In Russ.)
23. Shmelev V. R. *Mantijnye ul'trabazity ofiolitovyh kompleksov Polyarnogo Urala: petrogenesis i obstanovka formirovaniya* [Mantle ultramafics of ophiolite complexes of the Polar Urals: petrogenesis and formation environment]. *Petrologiya – Petrology*, 2011, vol. 19, no. 6, pp. 649–672 (In Russ.)
24. Grigor'ev S. I., Remizov D. N. *Kershorskij gabbroidnyj kompleks i problema ofiolitov Polyarnogo Urala* [Kershor gabbroic complex and the problem of ophiolites of the Polar Urals]. *Magmatizm i metamorfizm v istorii Zemli: materialy soveshhanija* [Proceedings of the All-Russian Petrographic Conference: materials of the meeting]. Ekaterinburg, Institut geologii i geohimii UrO RAN publ., 2010, pp. 191–192 (In Russ.)
25. Bogdanova A. R., Vahrusheva N. V., Shiryaev P. B. *Amfibolity ul'tramafitovogo massiva Raj-Iz (Polyarnyj Ural)* [Amfibolites of the ultramafic massif Rai-Iz (Polar Urals)]. *Metallogeniya drevnih i sovremennoj okeanov – Metallogeny of ancient and modern oceans*, 2022, pp. 175–180 (In Russ.)
26. Savel'ev D. E., Snachyov V. I., Romanovskaya M. A. *Novye dannye po geohimii porod poloschatogo kompleksa massiva Srednj Kraka (Yuzhnyj Ural)* [New data on the geochemistry of rocks of the banded complex of the Middle Kraka massif (Southern Urals)]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4: Voprosy geologii*, 2024, no. 4, pp. 35–50. DOI: <https://doi.org/10.31857/S2686739724010092>

- Geologiya – Proceedings of Moscow University. Series 4: Geology*, 2000, № 6, pp. 32–40 (In Russ.)
27. Pearce J. A. Immobile elements fingerprinting of ophiolites. *Elements*, 2014, vol. 10 (2), pp. 101–108.
28. Harris N. B., Pearce J. A., Tindle A. G. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. *J. Geol. Soc. Spec. Publ.*, 1986, vol. 19, pp. 67–81.
29. Wood D. A. 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*, 1980, vol. 50, pp. 11–30.
30. Simonen A. Stratigraphy and sedimentation of the Svecofenidic, early Archean supracrustal rocks in southwestern Finland. *Bulletin de la Commission Géologique de Finlande*, 1953, vol. 160, 64 p.
31. Leake B. E. The chemical distinction between ortho- and para-amphibolites. *J. Petrol.*, 1964, vol. 5, pp. 238–254.
32. Liao Y., Wei C., Rehman H. U. Titanium in calcium amphibole: Behavior and thermometry. *American Mineralogist*, 2021, vol. 106 (2), pp. 180–191. <https://doi.org/10.2138/am-2020-7409>
33. Schmidt M. W. Amphibole Composition in Tonalite as a Function of Pressure: An Experimental Calibration of the Al-in-Hornblende Barometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1992, vol. 110, pp. 304–310. <https://doi.org/10.1007/BF00310745>
34. Yardley B. W. An introduction to metamorphic petrology. *Longman Earth Sci. Series*, 1989, 248 p.

Рахимов Ильдар Рашитович, к.г.-м.н. с.н.с., Институт геологии – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), Уфа, РФ; e-mail: rigel92@mail.ru; ORCID 0000-0003-0020-6634

Самигуллин Айдар Альфридович, аспирант, м.н.с., Институт геологии – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), Уфа, РФ; e-mail: samigullinaidar85@gmail.com; ORCID 0000-0003-3089-0799

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Ildar R. Rakhimov, PhD in Geol.-Min., Senior Researcher, Institute of Geology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa, Russian Federation; e-mail: rigel92@mail.ru; ORCID 0000-0003-0020-6634

Aidar Al. Samigullin, Aspirant, Junior Researcher, Institute of Geology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa, Russian Federation; e-mail: samigullinaidar85@gmail.com; ORCID 0000-0003-3089-0799

All authors have read and approved the final manuscript.