

УДК 552.161; 553.22; 553.08

DOI: 10.24930/1681-9004-2025-25-6-1298-1323

## Минералого-геохимическая зональность и массоперенос между водонасыщенными габбро худолазовского комплекса и песчаниками зилаирской свиты (Восточный Бускун, Южный Урал)

Е. И. Михеев<sup>1</sup>, И. Р. Рахимов<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, e-mail: mikheev@igm.nsc.ru

<sup>2</sup>Институт геологии УФИЦ РАН, 450077, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 16/2

<sup>3</sup>Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, 620110, г. Екатеринбург, ул. Академика Вонсовского, 15

Поступила в редакцию 17.02.2025 г., принята к печати 22.04.2025 г.

**Объект исследования.** Породы контактового ореола многофазного габброидного массива Восточный Бускун худолазовского дифференцированного комплекса (Южный Урал). **Цель.** Установить особенности геохимического взаимодействия между магматическим телом и вмещающими вулканогенно-осадочными породами, определить физико-химические условия метаморфизма и метасоматоза, выявить минералого-геохимическую зональность разреза приконтактной области, оценить металлогенический потенциал роговиков. **Материалы и методы.** Минералы пород эндо- и экзоконтакта изучены методами оптической и сканирующей электронной микроскопии, валовый состав пород определен методами РФА и ИСП МС. Температуры контактового метаморфизма определены с помощью биотитового и хлоритового геотермометров. **Результаты.** В строении массива Восточный Бускун установлено несколько типов габброидов. Контактный ореол массива сложен тремя главными типами пород, отвечающими взаимодействию между такситовыми лейкогаббро массива и вмещающей вулканогенно-терригенной толщей: гиперстеновые и клинопироксеновые роговики, непосредственно контактирующие с породами массива, и  $chl \pm ms \pm bt$  роговики, слагающие большую часть экзоконтакта. Клинопироксеновые роговики, по сравнению с более удаленными от контакта роговиками, испытали привнос Ca, Sr, вынос Ti, Fe, Mg, Li, Rb, Ba. Особенности минерального и химического состава гиперстеновых роговиков отвечают основным магматическим породам и показывают сходство с беербахитами. Убогая рудная минерализация в породах эндо- и экзоконтакта представлена ильменитом, сульфидами меди и железа, в том числе платиносодержащим пирротинном в хлорит-слодяных роговиках. **Выводы.** Массив Восточный Бускун формировался как минимум в три петрогенетические фазы, что отразилось на многоэтапности метаморфического и метасоматического изменения вмещающих пород. Формирование контактового ореола связано с внедрением флюидонасыщенных такситовых оливин-роговообманковых лейкогаббро второй фазы, непосредственно контактирующих с вмещающей вулканогенно-осадочной толщей. Формирование приконтактной области происходило в два этапа: высокотемпературный этап (526–616°C) с образованием пегматоидных обособлений в габбро, гиперстеновых, клинопироксеновых и биотитсодержащих роговиков; низкотемпературный этап (253–458°C), с которым связано внедрение долеритовых даек и пропиловых кварц-хлорит-альбитовых жил, а также замещение биотита хлоритом. Наличие хлористых апатита и амфибола указывает на участие в метасоматозе хлорсодержащего флюида, а особенности массопереноса рудных элементов свидетельствуют об отсутствии сульфидных рудных тел под зоной контакта в составе массива Восточный Бускун.

**Ключевые слова:** Южный Урал, водонасыщенные габбро, массив Восточный Бускун, контактовый метаморфизм, метасоматоз, роговик, беербахит

### Источник финансирования

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-77-10049, <https://rscf.ru/project/22-77-10049> и за счет государственных заданий ИГМ СО РАН (№ государственной регистрации 122041400044-2) и ИГТ УрО РАН (№ государственной регистрации 123011800009-9)

## Mineralogical and geochemical zoning and mass transfer between the Khudolaz complex water-saturated gabbro and the Zilair Formation sandstones (Vostochnyi Buskun, Southern Urals)

**Для цитирования:** Михеев Е.И., Рахимов И.Р. (2025) Минералого-геохимическая зональность и массоперенос между водонасыщенными габбро худолазовского комплекса и песчаниками зилаирской свиты (Восточный Бускун, Южный Урал). *Литосфера*, 25(6), 1298–1323. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-6-1298-1323>. EDN: PLPJHJ

**For citation:** Mikheev E.I., Rakhimov I.R. (2025) Mineralogical and geochemical zoning and mass transfer between the Khudolaz complex water-saturated gabbro and the Zilair Formation sandstones (Vostochnyi Buskun, Southern Urals). *Lithosphere (Russia)*, 25(6), 1298–1323. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-6-1298-1323>. EDN: PLPJHJ

© Е.И. Михеев, И.Р. Рахимов, 2025

**Evgeny I. Mikheev<sup>1</sup>, Ildar R. Rakhimov<sup>2,3</sup>**

<sup>1</sup>*V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, 3 Academician Koptyug av., Novosibirsk 630090, Russia, e-mail: mikheev@jgm.nsc.ru*

<sup>2</sup>*Institute of Geology, UFGC RAS, 16/2 Karl Marx st., Ufa 450077, Russia*

<sup>3</sup>*A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS, 15 Academician Vonsovsky st., Ekaterinburg 620110, Russia*

Received 17.02.2025, accepted 22.04.2025

**Research subject.** The contact aureole rocks of the Vostochnyi Buskun multiphase gabbroic intrusion of the Khudolaz differentiated complex (Southern Urals). **Aim.** To study geochemical interactions between the magmatic body and host volcanogenic-sedimentary rocks, to determine the physicochemical conditions of metamorphism and metasomatism, to identify mineralogical and geochemical zoning of the contact aureole, and to assess the metallogenic potential of the rocks. **Materials and methods.** Minerals were studied by optical and scanning electron microscopy; the bulk composition of rocks was determined by XRF and ICP-MS. Contact metamorphism temperatures were determined using biotite and chlorite geothermometers. **Results.** Several types of gabbroids in the Vostochnyi Buskun massif have been identified. The contact aureole of the massif is composed of three main types of rocks, corresponding to the interaction between taxitic leucogabbro and host volcanogenic-terrigenous rocks: hypersthene and clinopyroxene hornfels in direct contact with the intrusion rocks, and *chl ± ms ± bt* hornfels, forming the greater part of the exocontact. Clinopyroxene metasomatites, in comparison with more distant from the contact hornfels, are characterized by an addition of Ca and Sr, and removal of Ti, Fe, Mg, Li, Rb, and Ba. The mineral and chemical composition of hypersthene hornfels correspond to mafic igneous rocks and show similarities with beerbachites. Poor ore mineralization in the contact aureole rocks is represented by ilmenite, copper, and iron sulfides, including platinum-bearing pyrrhotite in chlorite-mica hornfels. **Conclusion.** The Vostochnyi Buskun massif was formed via at least three petrogenetic phases, which resulted in the multi-stage metamorphic and metasomatic alteration of host rocks. The contact aureole formation is associated with injection of second-phase fluid-saturated taxitic olivine-hornblende leucogabbro, which were in direct contact with the host volcanogenic-sedimentary strata. The contact aureole formed in two stages: (1) a high-temperature stage (526–616°C) accompanied by pegmatoid segregations in gabbro, hypersthene, clinopyroxene, and biotite-bearing hornfels; and (2) a low-temperature stage (253–458°C), which is associated with dolerite dikes and propylitic quartz-chlorite-albite veins, as well as chlorite replacing biotite. The presence of chlorine-containing apatite and amphibole indicate the participation of chlorine-bearing fluid in metasomatism, while the features of the mass transfer of ore elements indicate the absence of sulfide ore bodies under the Vostochnyi Buskun massif contact zone.

**Keywords:** Southern Urals, Vostochnyi Buskun massif, water-saturated gabbro, contact metamorphism, metasomatism, hornfels, beerbachite

#### Acknowledgements

The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-77-10049, <https://rscf.ru/project/22-77-10049> and by the state assignments of the Institute of Geology and Mineralogy SB RAS (state registration No. 122041400044-2) and the Institute of Geology and Geochemistry UB RAS (state registration No. 123011800009-9)

## ВВЕДЕНИЕ

Контактные метаморфические и метасоматические породы сопровождают интрузивные тела разного состава и морфологии, позволяя обосновать условия консолидации и относительную возрастную привязку магматических тел в сложных тектонических областях (Семёнов, Яковлева, 1994; Чашин, 2007; Dasgupta, Bhowmik, 2021), а также оценить флюидный режим интрузии (Zou, 2013; Рахимов и др., 2020). Локальный метаморфизм вулканогенно-осадочных, а также терригенных и глинистых пород приводит к образованию роговиков и других приконтактных пород и часто сопровождается метасоматическими преобразованиями, которые вызывают существенное изменение минерального и химического состава исходной породы (Varton et al., 1991). Иногда к роговикам приурочена золоторудная минерализация (в ассоциации с сульфидами и халькогенидами),

а также молибденовая и редкоземельная минерализация, вплоть до рудопроявлений и месторождений (Горячев, 2003; Kitsault..., 2010; Малюкова, 2018; Рахимов и др., 2020; Михеев и др., 2025). По металлогеническому потенциалу роговики значительно уступают скарнам (также являющимся приконтактными породами, но обычно по карбонатному субстрату), чем обусловлено скромное количество научных работ, посвященных условиям образования первых. Также отметим, что для контактовых зон габбровых интрузий, по сравнению с гранитоидными, слабее изучена минералого-геохимическая зональность и физико-химические условия ороговикования, закономерности миграции магматогенного флюида и рудный потенциал (Sklyarov et al., 2023). С этим связана актуальность изучения роговиков в контакте с габброидами. Широкая распространенность этих пород, в том числе вблизи различных рудоносных интрузий, дает возможность лучше понять законо-

мерности распределения рудных элементов в экзоконтактовых зонах.

Температура формирования экзоконтактовых пород зависит от состава, глубины внедрения, морфологии и мощности интрузии и варьируется в диапазоне 400–1000°C, давление не превышает 2–3 кбар (Winter, 2014; Ревердатто и др., 2017; Bucher, 2023). Классификация роговиков аналогична классификации пород регионального метаморфизма и соответствует наиболее распространенным классам: метапелиты и кварц-полевошпатовые породы (по глинистым и терригенным породам, кислым вулканитам и туфам), и metabазиты (по мергелям, основным вулканитам и туфам, грауваккам). Отличие от регионально-метаморфических пород заключается в минеральном составе, соответствующем низкобарическим условиям формирования, и в структурно-текстурных характеристиках роговиков, которые наиболее часто бывают массивными и тонко- или скрытозернистыми. Одной из специфических разновидностей пород являются беербахиты, которые рассматриваются в качестве высокотемпературных роговиков по протолиту базитового состава и имеют дискуссионный генезис (см. обзор в (Склярков и др., 2020; Sklyarov et al., 2023)). Контактные ореолы интрузий основного состава часто имеют зональное строение и сложены породами, сформированными в условиях от пироксен-роговиковой до мусковит-роговиковой фаций. Обычным является изохимический тип метаморфизма, а процессы метасоматоза описаны в гораздо меньшем объеме по сравнению с кислыми и щелочными интрузиями, что обычно связано с низкой флюидонасыщенностью магм основного состава (Ревердатто и др., 2017).

Внутри Худолозовской мульды Южного Урала распространено множество мелких и разнообразных по составу интрузий, в том числе ультрамафит-мафитовые тела худолозовского дифференцированного комплекса, специализированного на Cu-Ni-PGE сульфидное оруденение (Салихов, Пшеничный, 1984; Rakhimov et al., 2021), а также многочисленные гидротермально-метасоматические месторождения и проявления золота (Серавкин и др., 2001; Rakhimov et al., 2023). Вокруг интрузий распространены в различной степени метасоматизированные и метаморфизованные вмещающие комплексы, представленные вулканогенно-терригенными породами. Еще А.А. Захаровой (1982ф) отмечалась перспективность измененных вмещающих пород на сульфидные руды на основе находок богатой пиритовой вкрапленности, что связывалось с региональным метаморфизмом. В дальнейшем эта идея не получила развития, однако недавно нами в экзоконтакте массива Ташлы-Тау худолозовского комплекса выявлена метасоматическая Co-Pd-Ag и Th-REE минерализация (Рахимов и др., 2020). На примере золоторудного проявления Билян-Тау

обоснована связь золото-кварцевых жил, локализованных в метасоматизированных туфах и роговиках, с магматогенным флюидом, отделившимся от габбровой интрузии (Рахимов и др., 2024). Для дальнейшей оценки перспектив экзоконтактов интрузий худолозовского комплекса мы исследовали вмещающие породы, вскрытые на контакте массива Восточный Бускун. Цель настоящей работы – на примере изученного разреза показать геохимическое взаимодействие между сложным по строению габбровым телом и вмещающими осадочными и вулканогенно-осадочными породами. Кроме того, мы попытались определить физико-химические условия метаморфизма и метасоматоза, дать представление о минералогическо-геохимической зональности разреза роговиков, а также оценить их металлогенический потенциал.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевые геологические исследования с отбором проб и детальным описанием разреза проводились в 2023 г, а в 2024 г. проведено дополнительное наблюдение после расширения и углубления карьера, заложенного на массиве Восточный Бускун.

Петрографическое изучение пород проводилось с помощью оптических микроскопов Carl ZEISS Axio Scope.A1 и Carl Zeiss Axioskop 40 A. Составы минералов исследовались методами сканирующей электронной микроскопии с пространственным разрешением до 2–10 нм и идентификацией исследуемых фаз с применением рентгеноспектрального ЭДС-детектора на электронном сканирующем микроскопе MIRA 3 LMU (TESCAN ORSAY Holding) с системами микроанализа INCA Energy 450+/Aztec Energy XMax 50+ и INCA Wave 500 (Oxford Instruments Nanoanalysis) в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск) и на электронном микроскопе Tescan Vega Compact с ЭДС-детектором Xplorer 15 Oxford Instruments в ИГ УФИЦ РАН (г. Уфа). В качестве эталона определения уровня сигнала использовался металлический кобальт.

Рентгенофлуоресцентный анализ проведен на энергодисперсионном спектрометре X-Calibur в ИГ УФИЦ РАН (г. Уфа). 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 аттестованные государственные образцы магматических пород. Определение микроэлементного состава пород выполнено на масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой Agilent 7500cx в Томском региональном ЦКП (г. Томск). Вскрытие проб проводилось в смеси фтороводородной и азотной кислот с использованием микроволновой печи.

Оценки температур метаморфизма проведены с помощью биотитового (Ti-in-biotite, Wu, Chen,

2015) и хлоритового (Lanari et al., 2014) геотермометров в программе PT\_Quick (Simakov, Dolivo-Dobrovolsky, 2009).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### Геологический очерк объекта

Изученный объект расположен в осевой части Худолазовской мульды Западно-Магнитогорской зоны Южного Урала (рис. 1а). Мульда имеет размер  $\approx 40 \times 20$  км, сложена девонскими вулканогенно-осадочными комплексами, формировавшимися в надсубдукционную стадию развития Южного Урала, и вмещает множество мелких интрузивных тел разного состава. Ядро мульды, по данным (Монтин и др., 2015), выполнено терригенными породами зилаирской свиты ( $D_3fm$ ), далее к западу развиты туфы базальтов, андезитов, дацитов, туфогравелиты и туфопесчаники биягодинской свиты ( $D_3f$ ), глинисто-кремнистые толщи мукасовской свиты, терригенные породы улутауской свиты ( $D_{2-3}gv-f$ ), а также базальтовые порфириды ирендыкской свиты ( $D_{2ef}$ ). Изученный нами разрез, по данным геолого-съёмочных работ, относится к зилаирской свите и приурочен к контактовой зоне массива Восточный Бускун.

Массив Восточный Бускун имеет сложное (компонитное) строение, он состоит из нескольких от-

дельных интрузий, слившихся между собой за счет многофазного внедрения магм (рис. 1б). Основная часть массива сложена мелкозернистыми габбро мезократового облика, среди которых различаются безоливиновые и оливиновые разновидности. В юго-восточной части развиты такситовые и такситоподобные среднезернистые габбро мезократового и лейкократового облика. Под оливиновыми такситовыми габбро, представляющими отдельную от безоливиновых габбро интрузию, залегают меланократовые мелкозернистые габбро. Они не обнажаются на дневной поверхности, но вскрыты в карьере. По данным (Бучковский и др., 1971ф), в южной части этой интрузии залегает небольшое рудное тело, представленное вкрапленными сульфидами (пирротин, халькопиритом, пентландитом) с содержанием Cu до 0.7 мас. %, Ni – до 0.4%, Pd – до 0.8 г/т. В северо-восточной части залегают пегматоидные габбро-диориты, а в северо-западной – развита интрузия плагиогранитов.

В Восточно-Бускунском карьере, в котором добываются облицовочные габбро, вскрыт разрез мощностью до 30–35 м. Снизу вверх в разрезе развиты меланократовые мелкозернистые оливин-роговообманковые габбро (10–15 м), лейкократовые такситовые среднезернистые оливин-роговообманковые габбро с обособлениями габбро-пегматитов (10–15 м) и полностью ороговикованные вмещающие терригенные породы (до 10 м). Пегматоид-

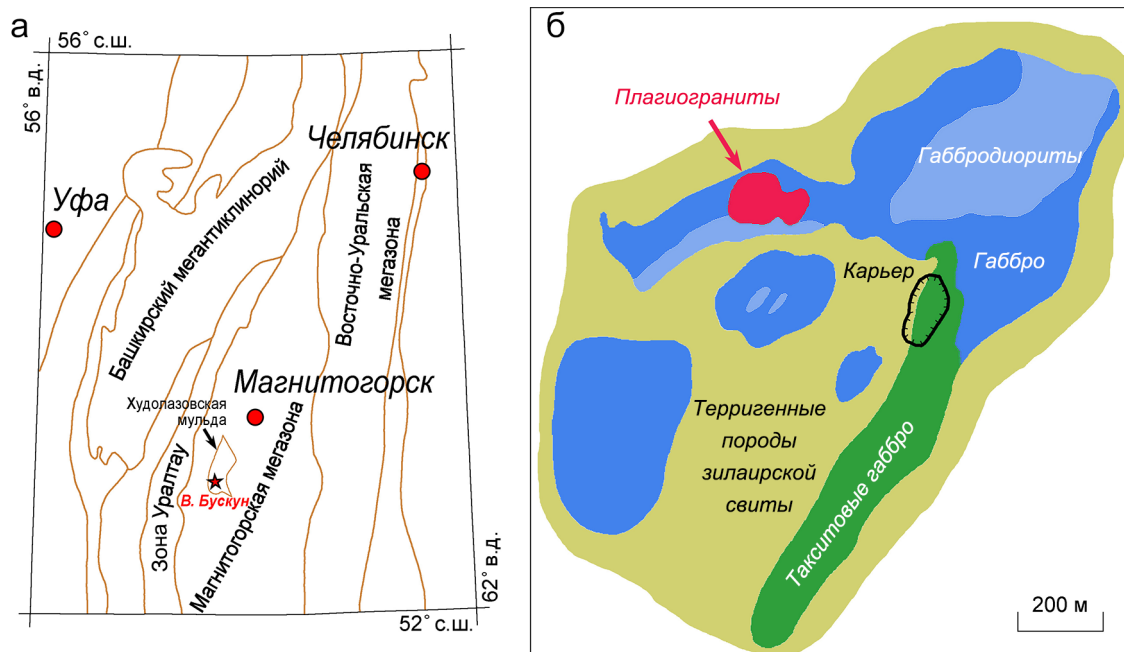


Рис. 1. Схемы структурного районирования Южного Урала (а; по (Знаменский, 2009)) и геологического строения участка развития массива Восточный Бускун (б; по (Бучковский и др., 1974ф)) с изменениями авторов.

Fig. 1. Structural scheme of the Southern Urals after (a; according to (Znamenskii, 2009)) and Schematic geological map of the Vostochniy Buskun massif (б; according to (Buchkovskii et al., 1974f)) modified by the authors.

ные обособления в такситовых лейкогаббро представлены жилами неправильной формы и раздувами размером до 0.2 м и имеют разнообразный минеральный состав. Часть из них представляет из себя крупно- и гигантозернистые скопления роговой обманки и плагиоклаза. Другая разновидность обособлений сложена крупными кристаллами роговой обманки по периферии, а в центральной части – ассоциацией кальциевых, преимущественно низкотемпературных минералов, представленных апофиллитом, пренитом, клиноцоизитом и диопсидом. В меланократовых габбро обнаружены жилы лейкократовых габбро и выявлен четкий контакт между интрузиями, что свидетельствует о более молодом возрасте такситовых габбро, непосредственно примыкающих к терригенной толще. Поздняя фаза массива представлена дайками порфировых долеритов, прорывающих лейкократовые габбро и породы вмещающей толщи.

Вся вскрытая вмещающая вулканотерригенная толща подвержена метаморфическим и метасоматическим преобразованиям. Мощность ореола контактовых преобразований вмещающих пород составляет не менее 15–20 м. Роговики имеют серо-коричневый, синевато-серый цвет (рис. 2а, б) с многочисленными пятнами и полосами светлых или темных оттенков. Породы интенсивно трещиноваты. Местами, особенно в отдалении от контакта, проявлена мелкоблочная трещиноватость с прямоугольными очертаниями глыб (см. рис. 2б). Разрез осложнен пликативными и дизъюнктивными нарушениями и представляет собой каскад складок волочения (см. рис. 2а), где поверхность срыва примерно совпадает с контактом габбровой интрузии. Значительная часть складок к настоящему времени эродирована. Контакт габбро и вмещающей толщи имеет сложную морфологию, обусловленную многочисленными ответвлениями (рис. 2в, г).

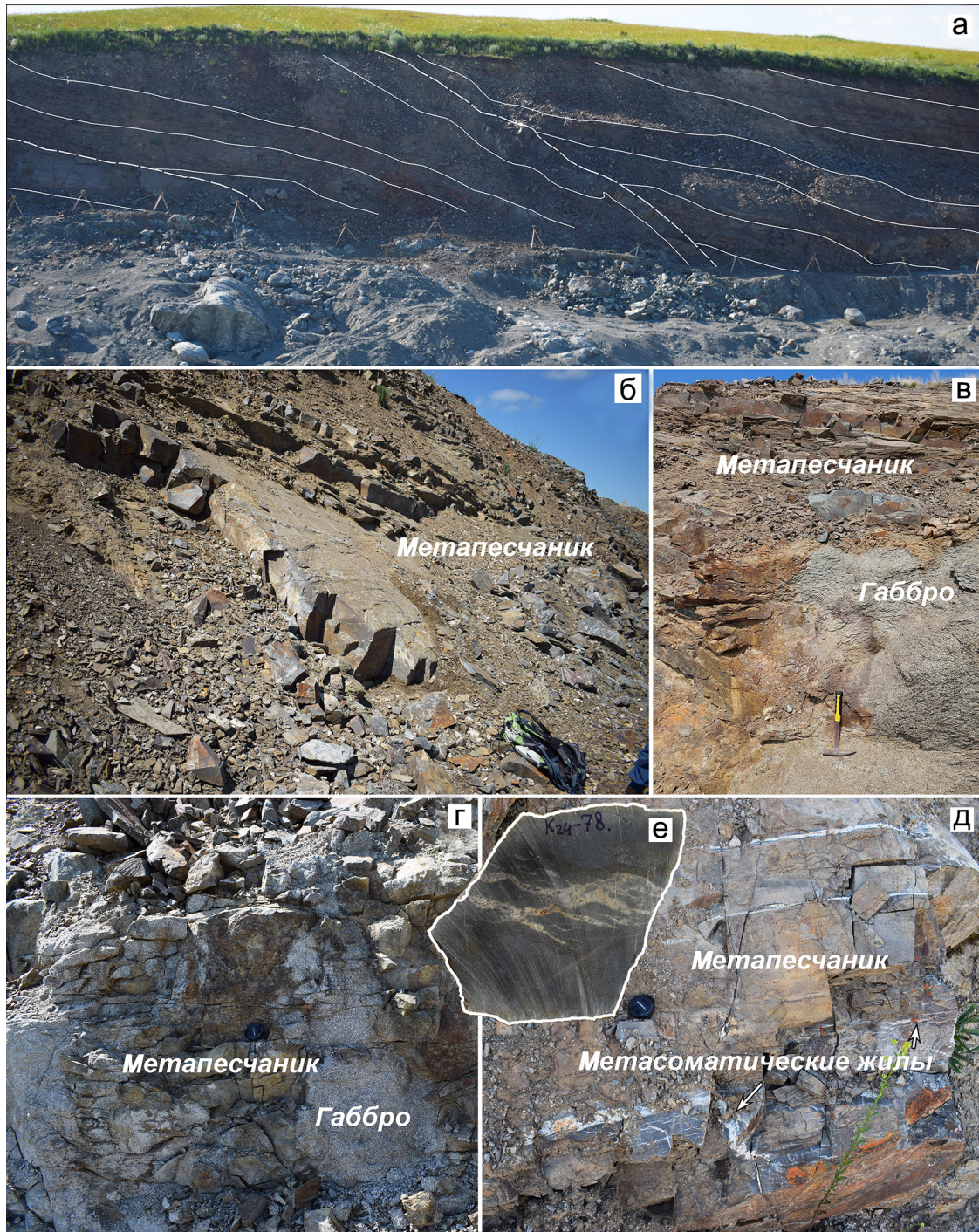
Эндо- и экзоконтактная области в пределах 2–3 м от контакта обильно пронизаны метасоматическими пропиловыми жилами хлорит-кварц-альбитового состава (рис. 2д). Выявлены два типа жил: синтетектонические и проникающие. Синтетектонические жилы имеют резкую четкую границу с вмещающими породами и относительно выдержанную мощность, заполняют полости с угловатыми границами, а отдельные части жил соединяются между собой ровными линейными рукавами. Проникающие, или жилы горячего внедрения, имеют резко неровные границы с многочисленными ответвлениями и сильноварьирующую мощность. Также они имеют четкий реакционный ореол толщиной 1–2 см (рис. 2е) с рыжеватой каймой на границе с окружающим роговиком. Эта кайма обусловлена повышенным количеством железистого хлорита. Синтетектонические жилы распространены более широко и имеют большую протяженность по сравнению с проникающими.

Таким образом, неизменных пород зилаирской свиты в зоне массива Восточный Бускун не обнаружено. Более того, нам их не удалось обнаружить и в окрестностях обнажений других массивов, даже на расстоянии в несколько десятков метров от видимых контактов. Это свидетельствует о масштабной метаморфической–метасоматической проработке вмещающих пород, возможно по всей площади мульды, за счет воздействия широко проявленного габброидного магматизма. Отчасти это подтверждается исследованиями постседиментационных преобразований граувакк Западно-Магнитогорской зоны, в том числе зилаирских, подверженных неравномерной флюидной проработке (Кокшина, 2013). В целом, по литературным данным, существуют несколько противоречивые сведения о составе пород зилаирской свиты. По данным (Бучковский и др., 1971ф), в центральной части Худолазовской мульды зилаирская свита представлена туфогенным материалом, тогда как в отчете (Цабадзе и др., 1984ф) в ней описаны песчаники, алевролиты и аргиллиты, хотя следует отметить, что в последней работе к зилаирской свите отнесены также и расположенные на западном борту мульды вулканогенно-обломочные породы, ныне относимые к биягодинской свите (D<sub>3</sub>f). В работе (Фазлиахметов, 2021) на основании изученного на севере Худолазовской мульды разреза указано, что граувакковые песчаники зилаирской свиты являются тефроидами.

### Петрография

Габбро, непосредственно контактирующие с вмещающей толщей, характеризуется высокой степенью метасоматического изменения. Первичные минералы представлены реликтами клинопироксена, большая часть породы сложена хлоритом, альбитом, актинолитом, эпидотом и другими минералами, псевдоморфно заместившими плагиоклаз, пироксен, оливин и роговую обманку. Слабоизмененные такситовые габбро, слагающие основную часть интрузии, обладают пойкилоофитовой структурой. В них развиты изометричные или слабобытянутые зерна оливина, приуроченные к интерстициям лейст плагиоклаза – главного минерала пород. Также в интерстициях развиты ксеноморфные ойкокристаллы клинопироксена и роговой обманки.

Долериты, слагающие дайки толщиной 0.2–1.0 м, характеризуются порфировой структурой. Вкрапленники сложены идиоморфными лейстами плагиоклаза, а тонкозернистая основная масса – плагиоклазом, роговой обманкой, рудным минералом и акцессорными титанитом, апатитом. Для пород характерно интенсивное развитие вторичных минералов как по вкрапленникам (вплоть до полных псевдоморфоз), так и по основной массе – серицита, кальцита, эпидота, актинолита, хлорита.



**Рис. 2.** Коллаж фотографий карьера Восточный Бускун.

а – вид западной стенки с элементами тектонической интерпретации в ороговикованных породах (сплошные линии – границы слоев, пунктирные линии – поверхности разрывов), мощность вскрытой части до 10 м; б – блочная трещиноватость ороговикованных пород; в, г – вид контакта габбро и метатерригенной толщи; д – пропилитовые (метасоматические) жилы в ороговикованных породах; е – образец с реакционным ореолом вокруг проникающих жил в ороговикованном песчанике.

**Fig. 2.** Collage of photographs of the Vostochnyi Buskun quarry.

а – view of the western wall with elements of tectonic interpretation in hornfels (solid lines – layer boundaries, dotted lines – fracture surfaces), thickness of the exposed part is up to 10 m; б – block-like fracturing of hornfels; в, г – view of the gabbro and metaterigenous strata contact; д – propylitic (metasomatic) veins in hornfels; е – sample with a reaction halo around propylitic veins in hornfels.

Породы контактового ореола прослежены по стенке карьера на 15 м вкост простирания контакта (т.н. № 35, N52.920528, E58.513913). По мере удаления от контакта с габбро выделяются следующие зоны: 1) сильновыветрелые, рыхлые, насыщенные слюдой породы, которые сложно исследовать традиционными методами (0–0.5 м); 2) трещиноватые гиперстеновые роговики (0.5–0.8 м); 3) зона плотных полосчатых клинопироксеновых роговиков (0.8–1.0 м); 4) массивные хлоритовые и хлорит-слюдяные роговики (1–15 м). Схема минеральной зональности по мере отдаления от контакта с габбро приведена в табл. 1. Перечисленные породы характеризуются микрокристаллическими роговиковыми структурами с размером зерен не более 100 мкм. Для статистики также приводятся результаты по образцам пород, аналогичных породам данного разреза, но опробованным незакономерно в другой точке наблюдения в карьере – т.н. № 36, N52.920987, E58.514321.

Гиперстеновые роговики (обр. № 35-7, 36-2) сложены зональным плагиоклазом (битовнит-лабрадор), гиперстеном, биотитом. Второстепенными минералами являются хлорит, кварц, куммингтонит. Среди аксессуарных минералов встречены ильменит и сульфиды железа, по которым развивается вторичный гетит (рис. 3а). Фрагментами в гиперстеновых роговиках присутствуют шпирсы, сложенные относительно крупными идиоморфными кристаллами плагиоклаза и субидиоморфными призматическими кристаллами гиперстена. Переход от шпиров к микрокристаллической “роговиковой” части пород постепенный, без резкого контакта.

Клинопироксеновые роговики (обр. № 35-1/1, 35-8, 35-11, 36-7) характеризуются полосчатым строением с различающимся минеральным составом полос мощностью 1–4 см. Сквозными мине-

ралами являются клинопироксен диопсид-геденбергитового ряда и основной плагиоклаз (рис. 3б). Другие кальциевые минералы представлены амфиболами, эпидотом, кальцитом, пренитом, титанитом. Породообразующими и второстепенными в разных пропорциях также являются кварц, хлорит, щелочной полевой шпат, мусковит. В качестве аксессуарных минералов встречены халькопирит, апатит, ильменит, циркон, баритоцелестин.

Главными минералами массивных хлоритовых и хлорит-слюдяных роговиков (обр. № 35-2, 35-3, 35-4, 35-5, 35-6) в разных пропорциях являются биотит, мусковит, хлорит, плагиоклаз, щелочной полевой шпат, кварц. Минеральный состав варьируется вдоль изученного интервала (см. табл. 1, рис. 3в, г). Хлорит, кварц и плагиоклаз являются сквозными минералами. Второстепенные и аксессуарные минералы представлены кальцитом, актинолитом, эпидотом, апатитом, ильменитом, сульфидами, монацитом, рутилом, титанитом, цирконом. Во многих роговиках отмечается редкая вкрапленность ксеноморфных зерен ортопироксена размером до 10 мкм.

Метасоматические пропиловитовые жилы, с обеих сторон пронизывающие породы приконтактной области, сложены хлоритом, кварцем, альбитом и, реже, кальцитом и характеризуются микрокристаллическими ксеноморфными и пойкилобластовыми структурами.

### Минеральный состав пород

*Ортопироксен* в качестве породообразующего минерала присутствует только в гиперстеновых роговиках и представлен вытянутыми и субизометричными зернами размером до 50 мкм (см. рис. 3а), по составу отвечающими гиперстену, –  $Wo_1En_{59-64}Fs_{34-39}$  (рис. 4а, табл. 2). Отмечается вы-

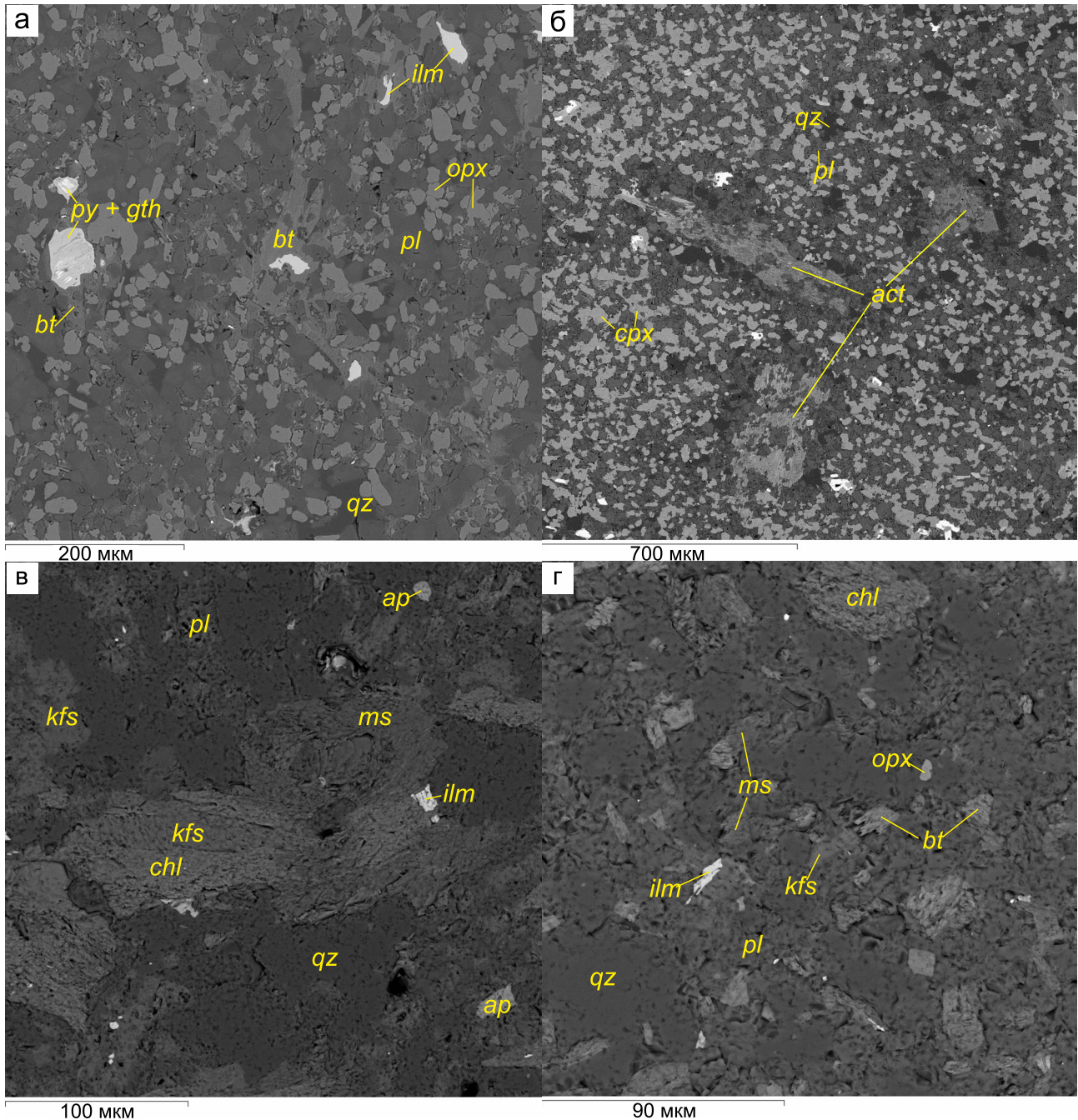
**Таблица 1.** Минеральный состав пород контактового ореола массива Восточный Бускун

**Table 1.** Mineral composition of the Vostochnyi Buskun massif contact aureole

№ обр.	Ассоциация	Расстояние от контакта, м
35-7	<b>pl, opx, bt, chl, qz, cum, ilm, py, gth</b>	0.5
35-8	<b>cpx, pl, act, hbl, ep, cal, prh, ttn, qz, chl, kfs, ms, ccp, ap, ilm, zrn, brt</b>	0.8
35-8-2	<b>pl, bt, chl (no bt), qz, act, ilm, ap, opx</b>	1
35-2	<b>chl, qz, ab, ms, kfs, cal, ap, rt, czo, ttn</b>	1
35-3	<b>chl, ms, qz, pl, kfs, ap, mnz, rt, ttn, zrn, ilm, ccp, py, gth, opx</b>	5
35-4	<b>chl, qz, pl, kfs, ms, rt, gth, opx</b>	10
35-5	<b>bt, chl, ms, qz, pl, kfs, ap, ilm, rt, ttn, zrn, opx</b>	15
35-6	<b>chl, qz, pl, ms, ilm, ttn, gth</b>	15

Примечание. Полу жирным шрифтом выделены главные минералы, обычным шрифтом – второстепенные и аксессуарные. Обр. № 35-8-2 непосредственно контактирует с клинопироксеновыми роговиками. Аббревиатуры минералов здесь и далее по (Warr, 2021).

Note. The main minerals are highlighted in bold, the minor and accessory minerals are highlighted in regular font. Sample No. 35-8-2 is in direct contact with *cpx* hornfels. Mineral abbreviations hereinafter are according to (Warr, 2021).



**Рис. 3.** Фрагменты структур пород контактового ореола.

а – гиперстеновый роговик, обр. № 35-7; б – клинопироксеновый роговик, обр. № 35-8; в, г – массивные хлоритовые и хлорит-слюдаые роговики: в – *pl-ms-chl* роговик, обр. № 35-3, г – *ms-chl-bt* роговик, обр. № 35-5.

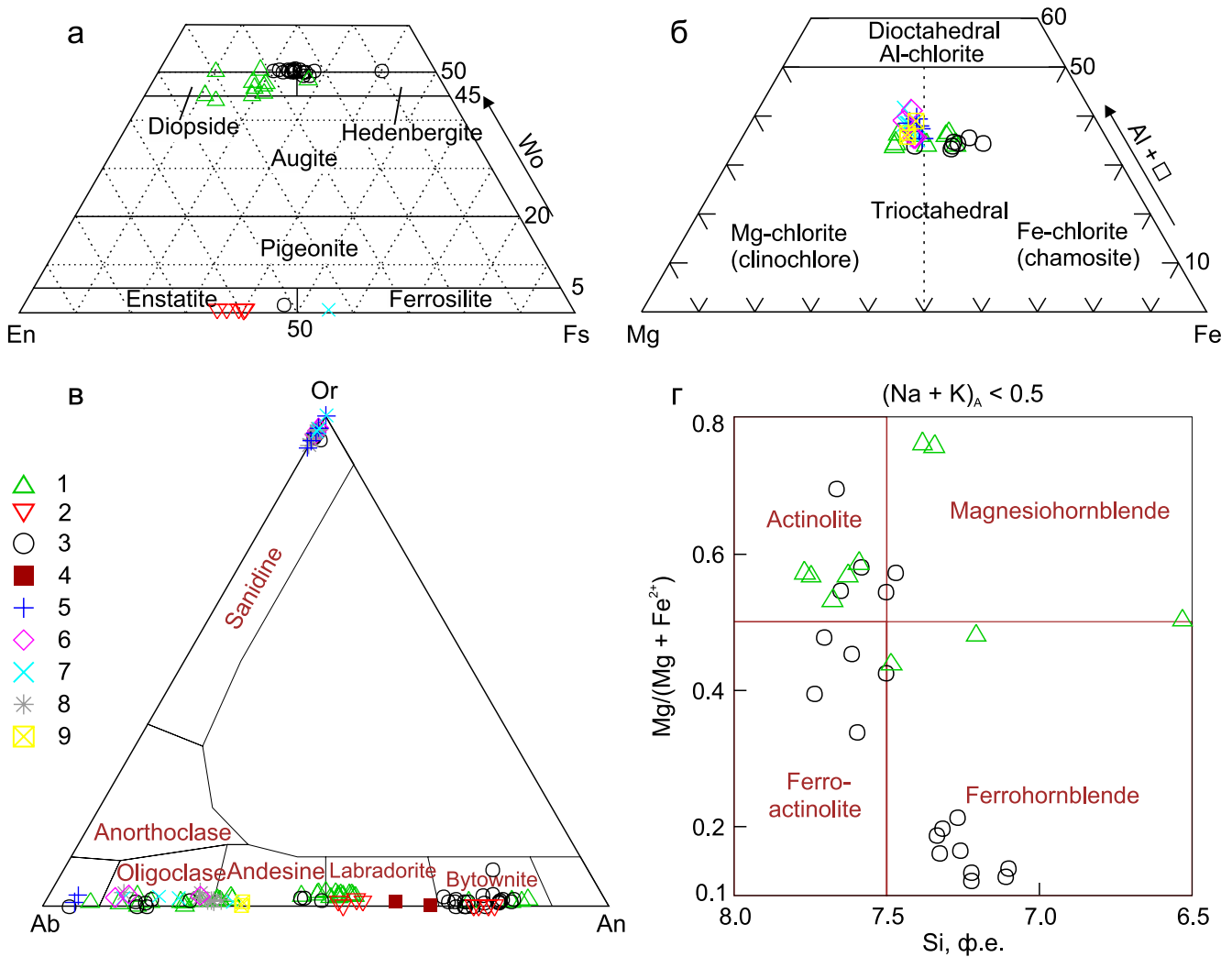
**Fig. 3.** Fragments of the contact aureole rock textures.

а – *opx* hornfel, sample 35-7; б – *cpx* hornfel, sample 35-8; в, г – *chl ± ms ± bt* hornfels: в – *pl ± ms ± chl* hornfel, sample 35-3, г – *ms ± chl ± bt* hornfel, sample 35-5.

сокое содержание  $Al_2O_3$  – 2.25–3.12 мас. %, также установлены примеси (в мас. %):  $TiO_2$  (0.23–0.43),  $Cr_2O_3$  (0.19–0.25),  $MnO$  (0.93–1.02),  $CaO$  (0.27–0.35). Редкие ксеноморфные микрокристаллы ортопироксена (5–10 мкм) зафиксированы также в

клинопироксеновых и хлоритовых роговиках (см. рис. 3а, табл. 1).

Моноклинный пироксен встречается в качестве породообразующего минерала в экзоконтактных клинопироксеновых роговиках и эндокон-



**Рис. 4.** Классификационные диаграммы для породообразующих минералов из эндоконтактового габбро (1) и пород контактового ореола (2–9) массива Восточный Бускун.

2 – гиперстеновый роговик, обр. 35-7; 3 – клинопироксеновый роговик, обр. 35-8; 4–9 – хлоритовые и хлорит-слюдяные роговики: 4 – обр. 35-8-2, 5 – обр. 35-2, 6 – обр. 35-3, 7 – обр. 35-4, 8 – обр. 35-5, 9 – обр. 35-6. а – для пироксена, б – хлорита, в – полевых шпатов, г – амфибола.

**Fig. 4.** Classification diagrams for rock-forming minerals from endocontact gabbro (1) and the contact aureole rocks (2–9) of Vostochnyi Buskun massif.

2 – hyp hornfels, sample 35-7; 3 – cpx hornfels, sample 35-8; 4–9 – chl ± ms ± bt hornfels: 4 – sample 35-8-2, 5 – sample 35-2, 6 – sample 35-3, 7 – sample 35-4, 8 – sample 35-5, 9 – sample 35-6. а – for pyroxenes, б – chlorites, в – feldspars, г – amphiboles.

тактовых метасоматизированных габбро. В роговиках он формирует ксеноморфные зерна размером до 30 мкм. По составу пироксен относится к членам твердого раствора диопсид–геденбергит –  $Wo_{49-51}En_{10-29}Fs_{20-36}$  (см. рис. 4а, табл. 2). Зональность по соотношению железа и магния выражена незначительно. Примеси (в мас. %) представлены  $TiO_2$  (0.20–0.35),  $Al_2O_3$  (0.47–0.93),  $MnO$  (0.98–2.22). В габбро клинопироксен образует призматические кристаллы, которые интенсивно замещаются вторичными минералами по трещинам; в некоторых случаях, при высокой степени изменения,

сохраняются очертания исходных вытянутых кристаллов, внутри которых находятся реликты незамещенного пироксена. По составу эти клинопироксены также относятся к ряду диопсид–геденбергит, но в среднем являются менее кальциевыми и более магниальными по сравнению с пироксенами из роговиков –  $Wo_{44-50}En_{24-44}Fs_{9-24}$  (см. рис. 4а, табл. 2). Примеси (в мас. %) представлены  $TiO_2$  (0.22–0.92),  $Al_2O_3$  (0.26–3.36),  $Cr_2O_3$  (0.25–0.54)  $MnO$  (0.4–5.51),  $Na_2O$  (0.22–0.42).

Плагиоклаз является одним из главных минералов всех рассмотренных пород. В породах экзокон-

**Таблица 2.** Химический состав (мас. %) и кристаллохимические формулы (ф.е.) пироксенов из пород экзо- и эндо-контакта массива Восточный Бускун

**Table 2.** Chemical composition (wt %) and crystal chemical formulas (apfu) of pyroxenes from exo- and endocontact rocks of Vostochnyi Buskun massif

Компонент	№ обр.								
	35-7			35-8			35-9		
SiO <sub>2</sub>	51.1	51.6	52.0	51.8	51.6	51.6	51.7	52.2	51.0
TiO <sub>2</sub>	0.30	0.30	0.38	0.28		0.28	0.25	0.37	0.92
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.78	2.46	2.25	0.77	0.68	0.91	1.04	0.96	3.36
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.19	0.25	–	–	–	–	–	–	0.25
FeO	23.9	22.2	21.3	12.8	12.9	12.3	10.8	11.1	6.65
MnO	1.02	0.97	0.96	1.32	1.25	0.98	0.97	0.88	–
MgO	20.6	21.9	22.6	9.09	9.20	9.75	11.9	12.5	15.2
CaO	0.27	0.31	0.35	24.2	24.4	24.6	22.6	22.1	21.7
Na <sub>2</sub> O	–	–	–	–	–	–	0.22	–	0.42
Total	100.1	100.1	99.7	100.3	100.0	100.5	99.5	100.1	99.5
Рассчитано на 6 атомов O									
Si, ф.е.	1.92	1.92	1.93	1.99	1.98	1.97	1.96	1.97	1.89
Ti	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.03
Al	0.12	0.11	0.10	0.03	0.03	0.04	0.05	0.04	0.15
Cr	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Fe <sup>3+</sup>	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01	0.03	0.00	0.05
Fe <sup>2+</sup>	0.73	0.67	0.65	0.41	0.41	0.38	0.31	0.35	0.15
Mn	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.00
Mg	1.15	1.22	1.25	0.52	0.53	0.55	0.68	0.70	0.84
Ca	0.01	0.01	0.01	0.99	1.00	1.01	0.92	0.90	0.86
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.03
En, %	59	62	64	26	27	28	34	35	44
Fs	39	35	34	21	21	20	17	18	11
Wo	1	1	1	50	51	51	47	45	45

Примечание. Обр. 35-7 – гиперстеновый роговик, 35-8 – клинопироксеновый роговик, 35-9 – эндоконтактовое габбро. Прочерк – содержание элемента ниже предела обнаружения (здесь и далее). Формульные содержания Fe<sup>3+</sup> рассчитаны по балансу зарядов.

Note. Sample 35-7 – *opx* hornfels, 35-8 – *cpx* hornfels, 35-9 – endocontact gabbro. Hereinafter dash means the value not determined or below the detection limit. Fe<sup>3+</sup> contents are calculated on the basis of charge balance.

такта он формирует ксеноморфные субизометричные и неправильные зерна (см. рис. 3). В гиперстеновых роговиках плагиоклаз характеризуется прямой зональностью: битовнит ( $Ab_{20-24}An_{76-80}$ ) – лабрадор ( $Ab_{43-47}An_{52-56}Or_{0-1}$ ) (рис. 4в, табл. 3). В клинопироксеновых роговиках он характеризуется зональным или неоднородным пятнистым строением с вариацией состава от битовнита ( $Ab_{16-28}An_{70-82}Or_{0-2}$ ) до андезина ( $Ab_{50-54}An_{45-49}Or_{0-2}$ ) и олигоклаза ( $Ab_{74-83}An_{16-25}Or_{0-2}$ ). Кроме этого, широко распространен олигоклаз-альбит ( $Ab_{84-95}An_{5-18}Or_{0-1}$ ) в ассоциации с пренитом и скаполитом в составе более позднего низкотемпературного агрегата. В хлоритовых и хлорит-слюдяных роговиках плагиоклаз формирует однородные изометричные кристаллы, по составу соответствующие альбиту и олигоклазу, реже – андезину ( $Ab_{64-94}An_{5-35}Or_{0-3}$ ), а в роговике, непосредственно контактирующем с клинопироксеновыми роговиками (обр. № 35-8-2), – лабрадору ( $Ab_{32-37}An_{62-68}Or_{0-1}$ ). В эндоконтактовых габбро плагиоклаз образует идиоморфные таблитча-

тые кристаллы с прямой зональностью от битовнита ( $Ab_{15-17}An_{82-85}Or_1$ ) и лабрадора-андезина ( $Ab_{44-53}An_{45-54}Or_{2-3}$ ) до олигоклаза-альбита ( $Ab_{66-91}An_{8-33}Or_{0-2}$ ). В наиболее измененных участках породы минерал участвует в альбит-хлорит-эпидот-кварцевом агрегате ( $Ab_{97}An_3$ ), замещающая первичные плагиоклазы. Для плагиоклаза в целом отмечается примесь FeO – 0.21–1.17 мас. %.

*Хлорит* в клинопироксеновых роговиках преимущественно замещает амфибол и пироксены вместе с другими минералами. В массивных хлоритовых и хлорит-слюдяных роговиках он является одним из главных сквозных минералов, где слагает микрочешуйчатые агрегаты, распределенные равномерно по породе, либо замещает биотит. Хлорит из эндоконтактового габбро в ассоциации с другими вторичными минералами замещает плагиоклаз и темноцветные минералы. По классификации (Zane, Weiss, 1998) (рис. 4б), хлориты из хлоритовых и хлорит-слюдяных роговиков относятся к магнезиальному типу (клинохлору), хлориты из

**Таблица 3.** Химический состав (мас. %) и кристаллохимические формулы (ф.е.) плагиоклаза из пород экзо- и эндоконтакта массива Восточный Бускун**Table 3.** Chemical composition (wt %) and crystal chemical formulas (apfu) of plagioclase from exo- and endocontact rocks of Vostochnyi Buskun massif

Компонент	№ обр.											
	35-7		35-8		35-8-2	35-2	35-3	35-4	35-5	35-6	35-9	
	с	г	с	г							с	г
SiO <sub>2</sub>	48.3	54.6	49.9	55.7	52.4	67.2	65.6	63.4	61.7	59.9	47.4	60.9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32.3	28.4	31.2	27.6	30.0	19.9	21.0	22.9	24.2	25.5	33.5	24.8
FeO	0.44	0.58	0.37	0.31	0.39	–	–	0.24	0.22	0.33	0.37	–
CaO	15.9	10.9	14.7	10.5	12.7	1.08	2.52	4.13	5.64	7.28	17.4	6.53
Na <sub>2</sub> O	2.62	5.49	3.32	5.99	4.26	10.8	10.2	9.17	8.32	7.43	1.95	7.94
K <sub>2</sub> O	–	0.17	0.33	0.19	0.13	0.11	0.29	0.34	0.27	–	0.17	0.16
Total	99.5	100.1	99.9	100.2	99.9	99.1	99.6	100.2	100.4	100.4	100.8	100.3
Рассчитано на 8 атомов О												
Si, ф.е.	2.23	2.47	2.29	2.51	2.38	2.96	2.90	2.80	2.73	2.66	2.17	2.70
Al	1.75	1.51	1.69	1.46	1.61	1.04	1.09	1.19	1.26	1.33	1.81	1.29
Fe	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
Ca	0.78	0.53	0.72	0.51	0.62	0.05	0.12	0.20	0.27	0.35	0.85	0.31
Na	0.23	0.48	0.30	0.52	0.38	0.93	0.87	0.79	0.71	0.64	0.17	0.68
K	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.00	0.01	0.01
Ab, %	23	47	28	50	37	94	87	79	72	65	17	68
An	77	52	70	49	62	5	12	20	27	35	82	31
Or	0	1	2	1	1	1	2	2	2	0	1	1

Примечание. Обр. 35-7 – ортопироксеновый роговик; 35-8 – клинопироксеновый роговик; 35-8-2, 35-2, 35-3, 35-4, 35-5, 35-6 – хлоритовые и хлорит-слюдяные роговики; 35-9 – эндоконтактовое габбро. Для зональных зерен: с – центр, г – край.

Note. Sample 35-7 – *hyp* hornfels; 35-8 – *cpx* hornfels; 35-8-2, 35-2, 35-3, 35-4, 35-5, 35-6 – *chl ± ms ± bt* hornfels; 35-9 – endocontact gabbro. For zoned grains: c – center, r – edge.

габбро и клинопироксеновых роговики более железистые – их составы попадают в поля и клинохлора, и шамозита. Среди примесей (в мас. %) отмечаются TiO<sub>2</sub> (0.20–0.32), MnO (0.40–2.22), CaO (0.15–1.20), K<sub>2</sub>O (0.12–0.72) (табл. 4). Хлорит также встречается в гиперстеновых роговики, где распределен равномерно по породе в виде микрочешуйчатых агрегатов.

**Амфибол.** Кальциевые амфиболы развиты в экзоконтактовых клинопироксеновых роговики и метасоматизированных габбро эндоконтакта. В роговики актинолит слагает резорбированные вытянутые порфиробласты в плагиоклаз-клинопироксеновой матрике и отдельные наиболее мелкие ксеноморфные кристаллы размером до 30 мкм. Также актинолит и роговая обманка формируют скопления зональных кристаллов, замещающих клинопироксен. В роговой обманке фиксируется содержание Cl – 0.11–0.16 мас. % (табл. 5). В габбро роговая обманка, представленная субидиоморфными вытянутыми зернами, замещается актинолитом, кальцитом и хлоритом. Примесь Cl в роговой обманке из габбро составляет 0.15–0.33 мас. %. Актинолит в габбро замещает как роговую обманку, так и клинопироксен. Для амфиболов из роговики отмечается повышенная железистость относительно амфиболов из габбро (рис. 4г). Единичные ксено-

морфные кристаллы кальциевых амфиболов встречаются в хлорит-слюдяных роговики (обр. № 35-8-2), находящихся в непосредственном контакте с клинопироксеновыми роговики. В гиперстеновых роговики встречаются редкие ксеноморфные зерна куммингтонита размером до 30 мкм.

**Биотит** является порообразующим минералом в хлорит-слюдяных роговики, где представлен таблитчатыми кристаллами размером 20–30 мкм. Примеси галогенов в нем не установлены. Наблюдается снижение магнезиальности и содержания TiO<sub>2</sub> от роговики, находящихся в непосредственном контакте с клинопироксеновыми роговики (обр. 35-8-2, Mg# – 62–72, TiO<sub>2</sub> – 4.09–5.19 мас. %), к хлорит-слюдяным роговики, удаленным от контакта (обр. 35-5, Mg# – 52–55, TiO<sub>2</sub> – 2.87–3.59 мас. %). Биотит как второстепенный минерал встречается в гиперстеновых роговики в виде отдельных таблитчатых зерен и чешуйчатых агрегатов, часто – на контакте с рудными минералами (ильменит, сульфиды), характеризуется высокой магнезиальностью Mg# – 70–75 и низким, до умеренного, содержанием TiO<sub>2</sub> – 2.90–4.20 мас. %.

**Мусковит** в клинопироксеновых роговики и эндоконтактовых габбро находится в виде микрочешуйчатого агрегата, замещающего плагиоклаз. В хлорит-слюдяных роговики является одним из

**Таблица 4.** Химический состав (мас. %) и кристаллохимические формулы (ф.е.) хлорита из пород экзо- и эндоконтакта массива Восточный Бускун

**Table 4.** Chemical composition (wt %) and crystal chemical formulas (apfu) of chlorite from exo- and endocontact rocks of Vostochnyi Buskun massif

Компонент	№ обр.											
	35-8		35-2		35-3		35-4		35-6		35-9	
SiO <sub>2</sub>	26.7	26.0	26.1	25.8	26.3	26.4	26.5	26.1	26.9	28.1	27.1	27.6
TiO <sub>2</sub>	–	–	0.22	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.3	19.4	21.4	21.3	20.3	22.5	21.7	23.8	20.2	20.4	19.8	20.1
FeO	29.6	31.2	24.6	24.2	24.9	22.4	23.3	21.6	23.6	22.8	24.6	22.0
MnO	1.42	1.39	0.48	0.74	0.53	0.79	0.9	0.57	1.05	0.97	1.51	1.46
MgO	12.5	10.5	14.6	15.5	15.3	15.9	15.0	15.4	15.9	14.0	14.6	16.3
CaO	0.15	0.24	–	–	–	–	–	–	0.18	0.34	0.18	0.92
K <sub>2</sub> O	–	–	–	–	–	–	–	0.12	–	0.65	–	–
Total	88.7	88.8	87.3	87.6	87.4	88.0	87.4	87.6	87.8	87.1	87.8	88.4
Рассчитано на 14 атомов О												
Si, ф.е.	2.87	2.81	2.75	2.71	2.78	2.72	2.77	2.69	2.81	2.94	2.85	2.85
Ti	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al <sub>IV</sub>	1.13	1.19	1.25	1.29	1.22	1.28	1.23	1.31	1.19	1.06	1.15	1.15
Al <sub>VI</sub>	1.18	1.28	1.40	1.35	1.30	1.46	1.45	1.58	1.29	1.46	1.31	1.29
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe	2.65	2.82	2.16	2.12	2.20	1.93	2.03	1.86	2.06	1.99	2.16	1.90
Mn	0.13	0.13	0.04	0.07	0.05	0.07	0.08	0.05	0.09	0.09	0.13	0.13
Mg	2.00	1.70	2.29	2.43	2.41	2.45	2.33	2.37	2.48	2.18	2.30	2.51
Ca	0.02	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.04	0.02	0.10
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.09	0.00	0.00
Fe#, %	57	62	49	47	48	44	47	44	45	48	48	43

Примечание. Обр. 35-8 – клинопироксеновый роговик; 35-2, 35-3, 35-4, 35-6 – хлоритовые и хлорит-слюдаые роговики; 35-9 – эндоконтактовое габбро. Здесь и далее Fe# = Fe/(Fe + Mg) × 100%.

Note. Sample 35-8 – cpx hornfels; 35-2, 35-3, 35-4, 35-6 – chl ± ms ± bt hornfels; 35-9 – endocontact gabbro. Hereinafter Fe# = Fe/(Fe + Mg) × 100%.

породообразующих минералов и равномерно распределен в породе. В некоторых зернах отмечается примесь BaO (0.36–2.03 мас. %).

*Пренит* является одним из главных минералов клинопироксеновых роговинок, где слагает ксеноморфные зернистые агрегаты вместе с кварцем и клинопироксеном. В качестве вторичного минерала встречается в габбро эндоконтакта. Примеси представлены (в мас. %) FeO (0.39–0.85) и MnO (0.26–0.56).

*Эпидот*. Минералы группы эпидота встречаются преимущественно в клинопироксеновых роговинок и метасоматизированных габбро эндоконтакта, реже – в хлоритовых роговинок. В клинопироксеновых роговинок он формирует микронные включения внутри пренита и отдельные субидиоморфные призматические и ксеноморфные кристаллы размером до 200 мкм, замещает роговую обманку и клинопироксен. Состав варьируется от клиноцоизита до РЗЭ-содержащего клиноцоизита (REE + Th – 0.06–0.39 ф.е.) и эпидота (Fe<sup>3+</sup> – 0.04–0.67 ф.е.). В габбро минерал представлен клиноцоизитом (Fe<sup>3+</sup> – 0.03–0.46 ф.е.), который вместе с хлоритом, мусковитом и кислым плагиоклазом разви-

вается как вторичный минерал по основному плагиоклазу. Образует ксеноморфные кристаллы размером до 500 мкм. В BSE-снимках проявлена неоднородность в связи с вариациями в содержании железа. В одном из хлоритовых роговинок (обр. № 35-2) встречен акцессорный REE-содержащий клиноцоизит (REE + Th – 0.24–0.54 ф.е.) в виде ксеноморфных зерен размером 100–200 мкм.

*Кальцит* в клинопироксеновых роговинок слагает ксеноморфные субизометричные зерна в ассоциации с другими кальциевыми минералами. Реже встречается в хлоритовых роговинок. В эндоконтактовых габбро развивается как вторичный минерал по амфиболу, пироксену, плагиоклазу. Постоянные примеси (мас. %) представлены FeO (0.22–0.93), MnO (0.21–1.79), MgO (0.20–0.66).

*Апатит* в габбро эндоконтакта формирует идиоморфные призматические кристаллы размером до 200 мкм, может содержать микронные включения сульфидов. В клинопироксеновых роговинок образует субидиоморфные призматические кристаллы размером до 50 мкм, также встречается в виде включений в титаните и шлиров кристаллов размером до 5 мкм. В хлоритовых и хлорит-слюдаых

**Таблица 5.** Химический состав (мас. %) и кристаллохимические формулы (ф.е.) кальциевого амфибола из пород экзо- и эндоконтакта массива Восточный Бускун**Table 5.** Chemical composition (wt %) and crystal chemical formulas (apfu) of calcium amphibole from exo- and endocontact rocks of Vostochnyi Buskun massif

Компонент	№ обр.									
	35-8					35-9				
SiO <sub>2</sub>	50.0	46.7	52.2	47.1	47.4	52.0	48.0	43.2	51.3	51.8
TiO <sub>2</sub>	0.33	—	—	—	—	0.23	1.05	1.05	1	0.25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.65	4.8	2.14	4.1	4.14	2.76	5.42	11.0	4.35	2.63
FeO	22.5	30.5	20.0	29.7	30.2	18.7	19.9	18.1	9.9	17.8
MnO	1.43	1.81	1.39	2.16	1.99	0.53	0.79	1.15	0.25	0.98
MgO	8.04	2.82	10.8	3.3	3.35	11.1	9.45	8.72	16.6	11.7
CaO	11.7	11.3	12.2	11.5	11.1	12.5	12.2	12.3	12.6	12.3
Na <sub>2</sub> O	0.35	0.39	—	0.49	0.43	—	0.70	1.02	0.92	0.26
K <sub>2</sub> O	—	0.14	—	0.20	0.18	—	0.30	0.71	0.31	0.14
Cl	—	0.13	—	—	0.11	—	0.15	0.30	—	—
Total	98.0	98.7	98.6	98.5	98.9	97.7	97.9	97.5	97.2	97.9
Расчитано на 23 атома О										
Si, ф.е.	7.54	7.28	7.70	7.36	7.37	7.69	7.22	6.53	7.39	7.64
Al <sup>IV</sup>	0.46	0.72	0.30	0.64	0.63	0.31	0.78	1.47	0.61	0.36
Ti	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.12	0.12	0.11	0.03
Al <sup>VI</sup>	0.19	0.16	0.07	0.11	0.13	0.17	0.18	0.49	0.13	0.10
Fe <sup>3+</sup>	0.20	0.57	0.23	0.43	0.47	0.09	0.15	0.32	0.04	0.16
Mn <sup>2+</sup> <sub>C</sub>	0.13	0.21	0.10	0.25	0.17	0.05	0.08	0.14	0.02	0.10
Fe <sup>2+</sup>	2.64	3.41	2.23	3.45	3.46	2.23	2.35	1.97	1.15	2.04
Mg	1.81	0.66	2.37	0.77	0.78	2.45	2.12	1.97	3.55	2.57
Mn <sup>2+</sup> <sub>B</sub>	0.06	0.03	0.08	0.04	0.09	0.02	0.02	0.01	0.01	0.03
Ca	1.89	1.89	1.92	1.92	1.84	1.98	1.96	1.99	1.95	1.95
Na <sub>B</sub>	0.05	0.08	0.00	0.04	0.06	0.00	0.02	0.01	0.04	0.03
Na <sub>A</sub>	0.05	0.04	0.00	0.11	0.07	0.00	0.18	0.29	0.22	0.05
K	0.00	0.03	0.00	0.04	0.04	0.00	0.06	0.14	0.06	0.03
Cl	0.00	0.03	0.00	0.00	0.03	0.00	0.04	0.08	0.00	0.00
Fe#, %	59	84	49	82	82	48	53	50	24	44

Примечание. Обр. 35-8 – клинопироксеновый роговик, 35-9 – эндоконтактовое габбро.

Note. Sample 35-8 – *cpk* hornfels, 35-9 – endocontact gabbro.

роговиках встречается в виде субидiomорфных и ксеноморфных кристаллов размером до 50 мкм. По составу апатиты всех пород соответствует фтор-apatиту (F 2.08–3.44 мас. %), а регулярными примесями (мас. %) являются Cl (0.11–0.39), SiO<sub>2</sub> (0.24–1.82), FeO (0.27–0.98), редко в апатитах из габбро отмечается примесь Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0.74–0.93).

*Калиевый полевой шпат* в клинопироксеновых роговиках встречается в виде ксеноморфных зерен. В хлоритовых и хлорит-слюдяных роговиках он вместе с альбитом замещает первичный плагиоклаз. Характерна примесь BaO – 0.35–1.44 мас. %.

*Кварц* является породообразующим минералом во всех породах контактового ореола, где представлен ксеноморфными зернами, в качестве второстепенного минерала встречен в эндоконтактовых габбро.

*Акцессорные минералы* в гиперстеновых роговиках представлены пиритом, ильменитом, в экзоконтактовых клинопироксеновых роговиках – апатитом, баритом, ильменитом, халькопиритом, ти-

танитом, цирконом; в хлоритовых и хлорит-слюдяных роговиках – цирконом, рутилом, монацитом, сульфидами, ильменитом, апатитом. В метасоматизированных габбро эндоконтакта акцессорными являются апатит, ильменит, пирит, халькопирит, титанит.

*Платиносодержащий пирротин*, Fe<sub>0.75–0.85</sub>S, в виде акцессорных ксеноморфных кристаллов размером до 170 мкм встречен в хлорит-слюдяных роговиках, пронизанных пропиловыми жилами. Часто характеризуется пористой структурой, образует сростания с халькопиритом. Содержание примеси Pt составляет 0.25–0.28 мас. %. Другими характерными примесями (мас. %) являются Ni (0.21–3.35) и Co (0.28–0.55).

### Химический состав пород

Массивные хлоритовые и хлорит-слюдяные роговики имеют близкие содержания большинства породообразующих элементов (табл. 6, рис. 5).

**Таблица 6.** Содержание породообразующих (мас. %) и примесных (г/т) элементов в породах эндо- и экзоконтакта массива Восточный Бускун

**Table 6.** Content of rock-forming (wt %) and trace (ppm) elements in endo- and exocontact rocks of Vostochnyi Buskun massif

Компонент	№ обр.												
	K <sub>23</sub> -108	35-9	35-7	36-2	35-1/1	35-8	35-11	36-7	35-2	35-3	35-4	35-5	35-6
SiO <sub>2</sub>	43.6	46.2	57.7	60.5	60.7	58.3	56.4	55.7	61.8	61.6	61.9	62.7	59.8
TiO <sub>2</sub>	0.56	0.42	0.55	0.91	0.60	0.59	0.53	0.53	0.78	0.72	0.77	0.74	0.74
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.4	14.1	14.1	13.5	14.7	13.6	14.5	15.2	14.2	14.7	14.8	14.6	14.8
ΣFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.84	5.67	11.2	10.9	3.47	4.72	4.14	6.15	8.67	7.18	8.54	7.49	8.82
MnO	0.11	0.57	0.34	0.35	0.25	0.29	0.45	0.29	0.20	0.17	0.25	0.23	0.24
MgO	15.7	2.91	5.38	5.67	1.57	2.49	2.06	3.15	4.29	3.78	4.41	3.94	4.48
CaO	10.9	17.9	6.84	3.30	11.4	13.2	16.8	12.5	1.07	1.96	1.11	2.15	2.66
Na <sub>2</sub> O	1.64	2.25	1.94	1.66	3.06	2.63	2.24	3.84	2.31	2.73	1.71	2.47	2.21
K <sub>2</sub> O	0.14	0.53	0.73	0.80	1.33	0.82	0.43	0.36	2.46	2.81	2.23	2.08	1.47
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.09	0.09	0.07	0.11	0.21	0.18	0.37	0.21	0.20	0.14	0.14	0.16	0.21
П. п. п.	3.24	8.52	1.08	1.66	2.00	3.83	2.52	2.11	3.46	3.70	3.78	2.75	3.98
Сумма	100.5	99.3	100.0	99.4	99.3	100.5	100.4	100.1	99.4	99.5	99.6	99.4	99.5
ГМ/НМ	–	0.45	0.45	0.43	0.31	0.33	0.35	0.40	0.39	0.37	0.39	0.37	0.41
ЖМ/FerM	–	0.43	0.78	0.78	0.24	0.35	0.31	0.41	0.59	0.48	0.57	0.50	0.58
АМ/АМ	–	0.30	0.25	0.22	0.24	0.23	0.26	0.27	0.23	0.24	0.24	0.23	0.25
ФМ/ФМ	–	0.20	0.29	0.28	0.09	0.13	0.12	0.17	0.21	0.18	0.21	0.19	0.23
ТМ/ТМ	–	0.030	0.039	0.067	0.041	0.043	0.037	0.035	0.055	0.049	0.052	0.051	0.050
НKM/NKM	–	0.20	0.19	0.18	0.30	0.25	0.18	0.28	0.34	0.38	0.27	0.31	0.25
ЩM/AlkM	–	4.25	2.66	2.08	2.30	3.21	5.26	10.6	0.94	0.97	0.76	1.19	1.50
Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	–	2.78	2.67	2.46	4.39	3.44	2.67	4.21	4.77	5.54	3.94	4.55	3.68
Li	2.7	14	24	–	–	18.6	–	–	–	56	–	57	–
Be	0.29	1.04	0.73	–	–	1.4	–	–	–	1.6	–	1.6	–
Sc	27	17.4	46	–	–	29	–	–	–	31	–	31	–
V	90	36	298	–	–	104	–	–	–	111	–	107	–
Cr	264	18.8	363	–	–	131	–	–	–	131	–	109	–
Co	55	13.5	54	–	–	19	–	–	–	23	–	25	–
Ni	122	32	299	–	–	86	–	–	–	119	–	110	–
Cu	44	26	102	–	–	84	–	–	–	52	–	33	–
Zn	51	92	100	–	–	71	–	–	–	52	–	63	–
Ga	8.7	10.2	13.4	–	–	9.3	–	–	–	11.9	–	12.8	–
Rb	2.8	12.2	34	–	–	28	–	–	–	65	–	58	–
Sr	618	852	547	–	–	570	–	–	–	345	–	337	–
Y	9.8	16.7	15	–	–	19	–	–	–	16.5	–	18.8	–
Zr	37	68	18.4	–	–	79	–	–	–	46	–	60	–
Nb	1.6	3.8	2.8	–	–	7	–	–	–	6.7	–	7.7	–
Ba	70	151	336	–	–	334	–	–	–	736	–	528	–
La	5	20	20	–	–	23	–	–	–	28	–	21	–
Ce	10.6	28	29	–	–	43	–	–	–	47	–	41	–
Pr	1.4	4.3	4.1	–	–	6.4	–	–	–	6.3	–	5.8	–
Nd	5.50	14.2	13.6	–	–	21.0	–	–	–	21.0	–	20.0	–
Sm	1.5	3.2	2.7	–	–	4.4	–	–	–	4.2	–	4.2	–
Eu	0.6	0.71	1.50	–	–	1.18	–	–	–	1.09	–	1.00	–
Gd	1.5	2.6	2.2	–	–	3.4	–	–	–	3.3	–	3.4	–
Tb	0.27	0.43	0.38	–	–	0.53	–	–	–	0.52	–	0.55	–
Dy	1.5	2.2	2.0	–	–	2.6	–	–	–	2.5	–	2.7	–
Ho	0.34	0.52	0.48	–	–	0.58	–	–	–	0.56	–	0.60	–
Er	0.87	1.6	1.6	–	–	1.7	–	–	–	1.7	–	1.8	–
Tm	0.11	0.24	0.24	–	–	0.27	–	–	–	0.23	–	0.25	–
Yb	0.92	1.8	1.9	–	–	1.9	–	–	–	1.8	–	1.9	–
Lu	0.11	0.25	0.25	–	–	0.26	–	–	–	0.22	–	0.23	–

Таблица 6. Окончание

Table 6. Ending

Компонент	№ обр.												
	K <sub>23</sub> -108	35-9	35-7	36-2	35-1/1	35-8	35-11	36-7	35-2	35-3	35-4	35-5	35-6
ΣPЗЭ	30.2	80.1	80.0	–	–	110	–	–	–	118	–	104	–
Eu/Eu*	1.22	0.75	1.88	–	–	0.93	–	–	–	0.90	–	0.81	–
Hf	0.75	1.80	0.53	–	–	2.10	–	–	–	1.16	–	1.60	–
Ta	0.09	0.24	0.20	–	–	0.46	–	–	–	0.45	–	0.58	–
W	–	0.33	0.04	–	–	0.59	–	–	–	0.67	–	1.10	–
Pb	6.2	5.60	9.80	–	–	22.0	–	–	–	16.1	–	18.5	–
Th	0.43	3.80	2.60	–	–	7.60	–	–	–	9.10	–	9.80	–
U	0.10	0.75	0.46	–	–	1.30	–	–	–	1.60	–	1.50	–

Примечание. Обр. K<sub>23</sub>-108 – неизменное лейкократовое габбро второй фазы массива Восточный Бускун; 35-9 – метасоматизированное габбро эндоконтакта; 35-7, 36-2 – гиперстеновые роговики; 35-1/1, 8, 11, 36-7 – клинопироксеновые роговики, 35-2, 35-3, 35-4, 35-5, 35-6 – хлоритовые и хлорит-слюдяные роговики. Прочерк – содержание не определялось. Значения петрохимических модулей рассчитаны по (Юдович, Кетрис, 2000): ГМ – гидролизатный, ЖМ – железный, АМ – алюмокремниевый, ФМ – фемический, ТМ – титановый, НКМ – нормированная щелочность, ЩМ – щелочной. Суммарное железо приведено в форме Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Note. Sample K<sub>23</sub>-108 – unaltered leucocratic gabbro of the Vostochnyi Buskun massif second phase; 35-9 – metasomatized endocontact gabbro; 35-7, 36-2 – hyp hornfels; 35-1/1, 8, 11, 36-7 – cpx hornfels, 35-2, 35-3, 35-4, 35-5, 35-6 – chl ± ms ± bt hornfels hornfels. Dash – the content was not determined. The values of petrochemical modules are calculated according to (Yudovich, Ketris, 2000): ГМ – hydrolysat, ЖМ – ferrous, АМ – aluminosilica, ФМ – femic, ТМ – titanium, НКМ – normalized alkalinity, ЩМ – alkaline. Total Fe as Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

В узкий диапазон содержаний попадают (мас. %): SiO<sub>2</sub> (59.8–62.7), TiO<sub>2</sub> (0.72–0.78), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (14.2–14.8), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>t</sup> (7.18–8.82), MnO (0.17–0.25), MgO (3.78–4.48), наибольшим разбросом характеризуются CaO (1.07–2.66), Na<sub>2</sub>O (1.71–2.73), K<sub>2</sub>O (1.47–2.81). Гиперстеновые роговики, наиболее близко расположенные к контакту с габбро, сопоставимы с хлоритовыми и хлорит-слюдяными роговиками по содержанию (мас. %): SiO<sub>2</sub> (57.7–60.5), TiO<sub>2</sub> (0.55–0.91), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (13.5–14.1), Na<sub>2</sub>O (1.66–1.94), имеют пониженные содержания K<sub>2</sub>O (0.73–0.8) и повышенные – Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (10.9–11.2), MnO (0.34–0.35), MgO (5.38–5.67), CaO (3.3–6.84). Клинопироксеновые роговики по составу характеризуются высоким содержанием (мас. %) SiO<sub>2</sub> (55.7–60.7) и одновременно высоким CaO (11.4–16.8). Также по сравнению с хлоритовыми и хлорит-слюдяными роговиками они характеризуются повышенными содержаниями MnO (0.25–0.45), Na<sub>2</sub>O (2.24–3.84), более низкими – TiO<sub>2</sub> (0.53–0.6), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>t</sup> (3.47–6.15), MgO (1.57–3.15), K<sub>2</sub>O (0.36–1.33) и соизмеримыми – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (13.6–15.2).

Хлоритовые и хлорит-слюдяные роговики характеризуются содержанием примесных элементов, находящимся на одном уровне или не превышающим таковое для постаршейского глинистого сланца (рис. 6а). Это характерно для всех групп элементов (г/т): сидерофильных (V – 107–111, Cr – 109–131, Co – 23–25), халькофильных (Cu – 33–52, Zn – 52–63, Ga – 11.9–12.8, Pb – 16.1–18.5), крупноионных литофильных (Rb – 58–65, Ba – 528–736, Sr – 337–345), высокозарядных (Nb – 6.7–7.7, Zr – 46–60), редкоземельных (ΣPЗЭ – 104–118), Y (16.5–18.8), Th (9.1–9.8). Исключения составляют более

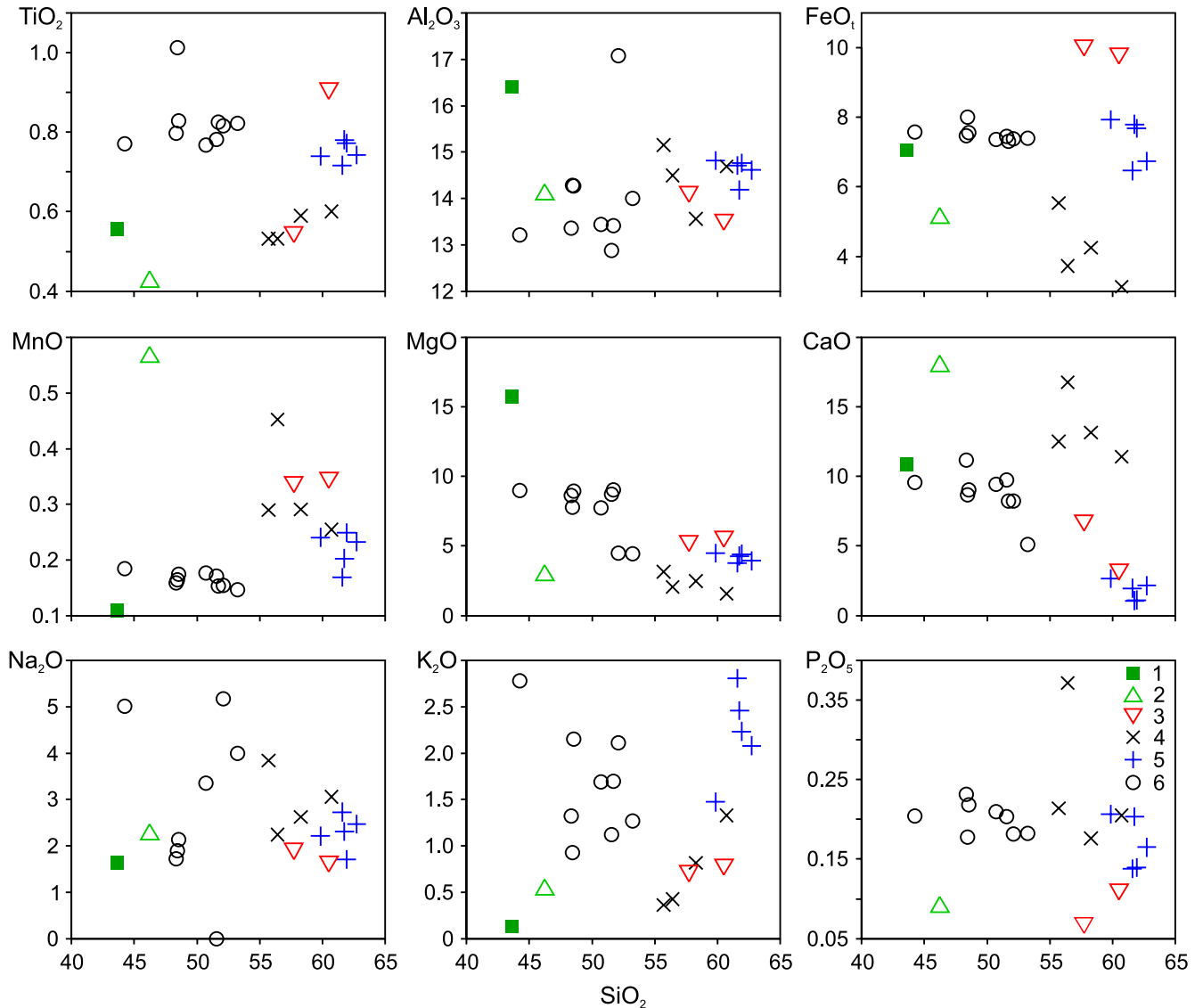
высокие Sc (31) и Ni (110–119). Спектры распределения PЗЭ характеризуются обогащением легкими элементами относительно тяжелых и наличием слабой отрицательной европиевой аномалии (La<sub>n</sub>/Yb<sub>n</sub> – 8–11, Eu/Eu\* – 0.8–0.9) (рис. 6б).

Клинопироксеновые роговики имеют близкие к хлоритовым и хлорит-слюдяным роговикам содержания (г/т): Sc (29), V (104), Cr (131), Co (19), Y (19), Zr (71), Nb (7), Hf (2.1), Th (7.6), повышенные – Cu (84), Zn (71), Sr (570), пониженные – Ni (86), Ga (9.3), Rb (28), Ba (334) (см. табл. 6, рис. 6а). Содержание и характер распределения PЗЭ клинопироксеновых роговиков идентичны таковым для хлоритовых и хлорит-слюдяных роговиков (ΣPЗЭ – 110, La<sub>n</sub>/Yb<sub>n</sub> – 8, Eu/Eu\* – 0.9; см. рис. 6б).

Для гиперстеновых роговиков отмечается высокое содержание (г/т) сидерофильных (V – 298, Cr – 363, Co – 54, Ni – 299) и халькофильных (Cu – 102, Zn – 100) элементов, а также повышенные концентрации Sr (547) относительно других пород контактового ореола. Для остальных редких элементов характерно более низкое содержание по сравнению с клинопироксеновыми, хлоритовыми и хлорит-слюдяными роговиками (см. табл. 6, рис. 6). Спектры PЗЭ характеризуются фракционированным распределением с Eu-максимумом (La<sub>n</sub>/Yb<sub>n</sub> – 7, Eu/Eu\* – 1.9).

#### Физико-химические условия контактового метаморфизма

Минеральный состав хлоритовых и хлорит-слюдяных роговиков (см. табл. 1) отвечает обычным ассоциациям метапелитов фации мусковитовых роговиков и, возможно, низов фации амфибо-



**Рис. 5.** Вариационные диаграммы Харкера для пород массива Восточный Бускун (1, 2), его контактового ореола (3–5) и неизменных песчаников зилайской свиты севера Худолазовской мульды (6).

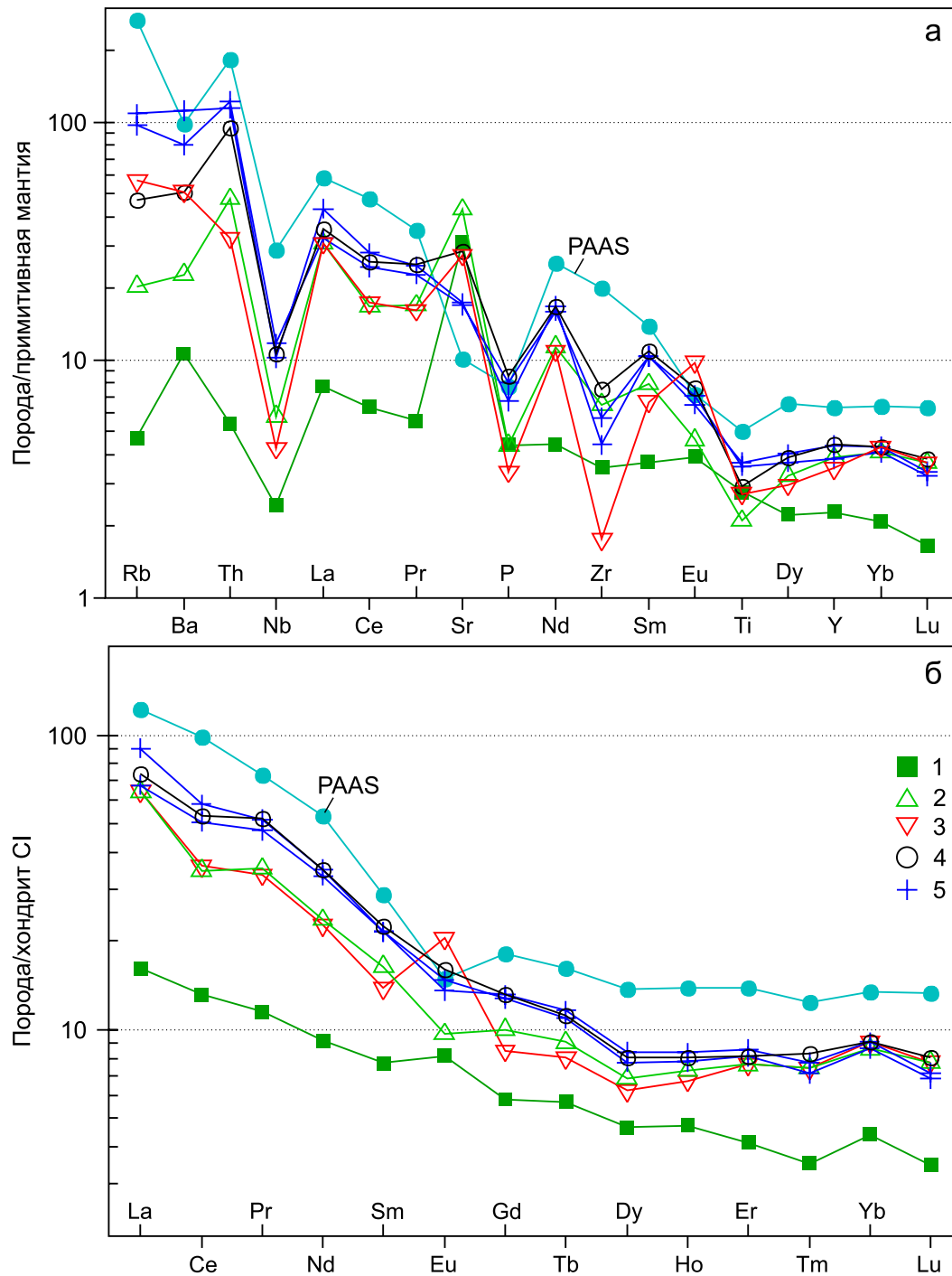
1 – неизменное лейкократовое габбро второй фазы массива Восточный Бускун, 2 – метасоматизированное габбро эндоконтакта, 3 – гиперстеновые роговики, 4 – клинопироксеновые роговики, 5 – хлоритовые и хлорит-слюдяные роговики. Составы песчаников – по (Фазлиахметов, 2021). Суммарное железо пересчитано на FeO.

**Fig. 5.** Major-element variation diagrams for rocks of the Vostochnyi Buskun massif (1, 2), its contact aureole rocks (3–5) and unaltered sandstones of the Zilair Formation in the north of Khudolaz trough (6).

1 – unaltered leucocratic gabbro of the second phase of the Vostochnyy Buskun massif, 2 – metasomatized gabbro of the endocontact, 3 – *hyp* hornfels, 4 – *cpx* hornfels, 5 – *chl ± ms ± bt* hornfels. Sandstones composition after (Fazliakhmetov, 2021). Total Fe as FeO.

ловых роговики ( $\approx 300\text{--}600^\circ\text{C}$ ) (Ревердатто, 1970). На основе петрографо-минералогического анализа установлено, что метаморфизм проходил в два этапа. Более высокотемпературному отвечает формирование биотита, второму этапу – низкотемпературному – образование хлорита, часто развитого по биотиту. Оценки температур метаморфизма

проводились с помощью биотитового (Wu, Chen, 2015) и хлоритового (Lanari et al., 2014) термометров. Значения давлений приняты как 1–2 кбар, типичные для пород контактового метаморфизма (Ревердатто, 2017). Интервал оценок по биотиту составил  $526\text{--}616^\circ\text{C}$  (табл. 7), по хлориту –  $253\text{--}458^\circ\text{C}$  (табл. 8).



**Рис. 6.** Мультиэлементные спектры (а) и спектры распределения РЗЭ (б) в породах массива Восточный Бускун (1, 2) и контактового ореола (3–5).

1 – неизменное лейкократовое габбро второй фазы массива, 2 – метасоматизированное габбро эндоконтакта, 3 – гиперстеновый роговик, 4 – клинопироксеновый роговик, 5 – хлоритовые и хлорит-слюдяные роговики. PAAS – постархейский глинистый сланец (Taylor, McLennan, 1985). Состав примитивной мантии – по (Sun, McDonough, 1989), хондрита CI – по (Boynnton, 1984).

**Fig. 6.** Primitive mantle-normalized trace element (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) in rocks of the Vostochniy Buskun massif (1, 2) and contact aureole (3–5).

1 – unaltered leucocratic gabbro of the second phase of massif, 2 – metasomatized gabbro of the endocontact, 3 – *hyp* hornfels, 4 – *cpx* hornfels, 5 – *chl* ± *ms* ± *bt* hornfels. PAAS composition after (Taylor, McLennan, 1985). Composition of primitive mantle – after (Sun, McDonough, 1989), CI chondrite – after (Boynnton, 1984).

**Таблица 7.** Оценки температур формирования биотита из пород контактового ореола массива Восточный Бускун по биотитовому геотермометру (Wu, Chen, 2015)

**Table 7.** The formation temperatures estimates of biotite from contact aureole rocks of Vostochnyi Buskun massif using a Ti-in-bt geothermometer (Wu, Chen, 2015)

Порода	№ обр.	Давление, кбар	T, °C
Гиперстеновый роговик	35-7	1	526–575
		2	534–584
Хлоритовые и хлорит-слюдаые роговики	35-8-2	1	562–606
		2	571–616
	35-5	1	559–593
		2	568–602

**Таблица 8.** Оценки температур формирования хлорита из габбро и пород контактового ореола массива Восточный Бускун по хлоритовому геотермометру (Lanari et al., 2014)

**Table 8.** The formation temperatures estimates of chlorite from contact aureole rocks of Vostochnyi Buskun massif using a geothermometer (Lanari et al., 2014)

Порода	№ обр.	Давление, кбар	T, °C
Габбро эндоконтакта	35-9	1	253–436
		2	267–452
Клинопироксеновый роговик	35-8	1	331–392
		2	345–408
Хлоритовые и хлорит-слюдаые роговики	35-2	1	270–439
		2	282–458
	35-3	1	285–368
		2	297–385
	35-4	1	252–316
		2	264–331
	35-6	1	283–319
		2	297–332

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

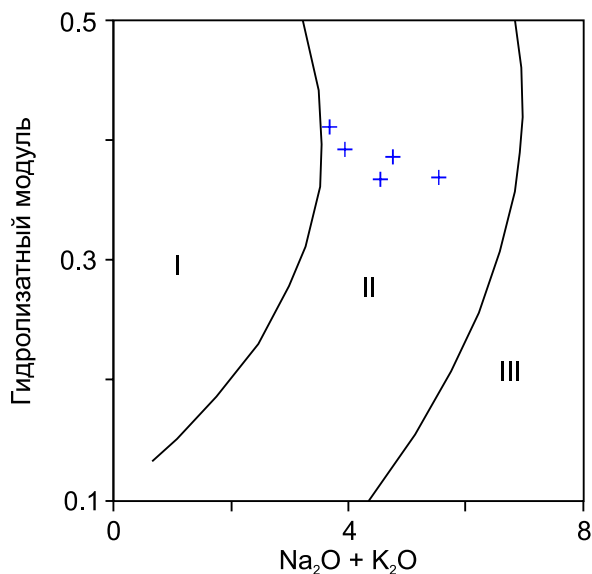
### Протолиты пород контактового ореола и признаки метасоматических процессов

Исследованные роговики приурочены к контактовой зоне сложнопостроенного габброидного массива Восточный Бускун, который в указанной области прорывает осадочные породы зилаирской свиты. Отсутствие реликтовых структур и минералов в приконтактных породах позволяет реконструировать протолит лишь исходя из геохимических данных.

Для изученного разреза экзоконтакта, за исключением приконтактных ортопироксеновых и клинопироксеновых роговиков, в целом отмечается монотонное строение. Экзоконтакт сложен роговиками, минеральный ( $pl + chl + qz \pm ms \pm bt \pm kfs$ ) и химический (CaO – 1.07–2.66 мас. %,  $Al_2O_3$  – 14.2–14.8 мас. %) состав которых отвечает метапелитам. По значениям петрохимических модулей изученные хлоритовые роговики классифицируются как нормопсевдосиаллиты (Юдович, Кетрис, 2000), что, с учетом повышенного содержания MgO (>3 мас. %), предполагает в качестве протолита

та вулканогенно-осадочные породы или граувакковые песчаники. Это подтверждается соотношением гидролизатного модуля и суммой щелочей, по которому протолит соответствует терригенным породам (рис. 7), и согласуется с литологическим составом зилаирской свиты.

Расположенные наиболее близко к контакту с габбро гиперстеновые роговики имеют не совсем ясное происхождение в разрезе. По минеральному составу они соответствуют габброидам ( $pl + орх + bt \pm qz$ ). Также породы характеризуются ксеноморфной роговиковой (= мозаичной = гранулитовой) структурой, в которой, однако, сохраняются шликероподобные фрагменты с более крупными идиоморфными лейстами плагиоклаза и призматическими кристаллами ортопироксена, что может указывать на их принадлежность к породам массива, т. е. к эндоконтакту. По значениям петрохимических модулей они классифицируются как псевдосиферлиты (ГМ – 0.45, ЖМ – 0.78, MgO > 3 мас. %, ЦМ – 2.66, см. табл. 6), что позволяет предположить вулканогенно-осадочный или вулканогенный протолит основного состава. По высокому содержанию сидерофильных (Cr, Ni, V) и халькофильных (Cu, Zn) элементов гиперстеновые роговики аналогичны раз-



**Рис. 7.** Состав хлоритовых и хлорит-слюдяных роговиков экзоконтакта массива Восточный Бускун на диаграмме “гидролизатный модуль – сумма щелочей” для определения протолита метаморфических пород (Юдович, Кетрис, 2000).

Обозначения полей: I – карбонатные породы, II – терригенные породы, III – магматические породы.

**Fig. 7.** Composition of *chl* ± *ms* ± *bt* hornfelses from exocontact of Vostochnyi Buskun massif on the diagram “hydrolyzate module – total alkali” for determining the metamorphic rocks protolith (Yudovich, Ketris, 2000).

I – carbonate rocks, II – terrigenous rocks, III – igneous rocks.

личным типам базальтоидов (Фролова, Бурикова, 1997; Kelemen et al., 2014). Особенности минерального и химического состава и структуры гиперстеновых роговиков сближают их с беербахитами – основными породами, либо приуроченными к экзоконтактовым зонам мафит-ультрамафитовых массивов, либо самостоятельно слагающими небольшие интрузивные тела (Врублевская и др., 2003; Скляр и др., 2020; Sklyarov et al., 2023). Таким образом, эти породы могут представлять собой как заключенную часть массива Восточный Бускун, так и относиться к экзоконтакту с существенным изменением первичного химического состава вследствие контакто-метасоматических процессов.

Клинопироксеновые роговики по химическому составу во многом сходны с хлорит-слюдяными и хлоритовыми роговиками (см. рис. 5, 6), но содержат признаки контактового диффузионного метасоматоза, выраженные в значительно повышенном содержании CaO (Sr) и пониженном K<sub>2</sub>O (Rb, Ba). О метасоматической природе пород также свидетельствует повышенная относительно других по-

род разреза железистость клинопироксена, амфибола, хлорита (см. рис. 4).

Еще одна разновидность метасоматических пород представлена поздними инфильтрационными хлорит-альбит-кварцевыми жилами (пропилитами), пронизывающими зону экзоконтакта и маркирующими низкотемпературный этап.

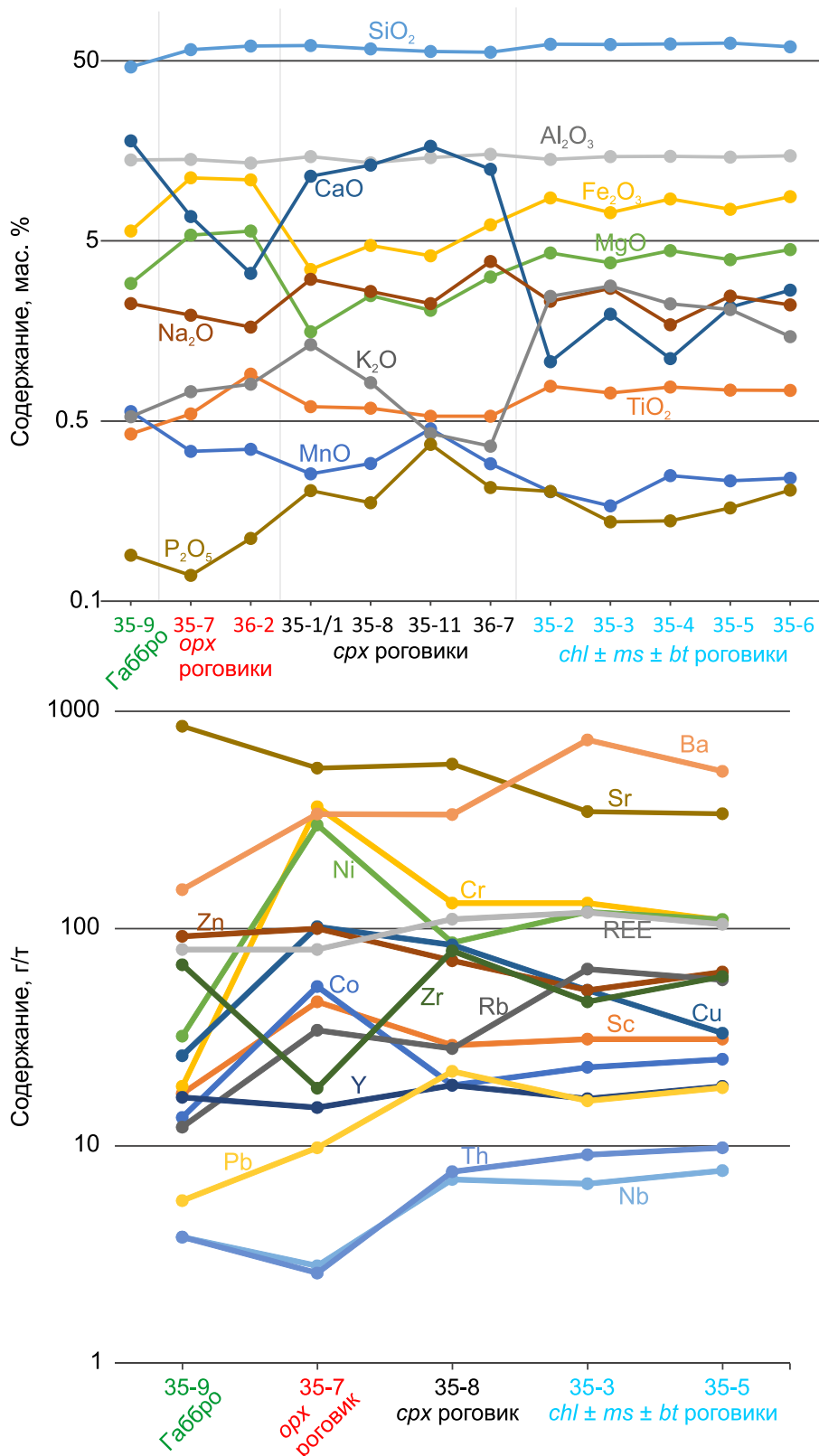
### Особенности метаморфического процесса в экзоконтактовой зоне и этапы минералообразования

Распространенные минеральные ассоциации роговиков свидетельствуют о том, что уровень метаморфизма соответствовал условиям не ниже высокотемпературной части фации мусковитовых роговиков ( $P = 1\text{--}2$  кбар,  $T = 500\text{--}600^\circ\text{C}$ ). О более высоких температурах в зоне экзоконтакта может свидетельствовать ортопироксен, который встречается в виде редких реликтовых зерен размером в первые микроны, что, вероятно, указывает на его растворение на регрессивной стадии метаморфизма.

Представленные минеральные ассоциации пород экзоконтакта позволяют выделить два этапа метаморфических (и метасоматических) процессов. Первый этап – высокотемпературный, с ним связано формирование биотитсодержащих роговиков, преимущественно слагающих экзоконтактовую зону, и клинопироксеновых роговиков, которые проявлены вдоль узкой полосы вблизи контакта и, вероятно, являются диффузионными. Второй этап – низкотемпературный, что фиксируется по замещению биотита хлоритом, уменьшению основности плагиоклаза в роговиках и вторичными преобразованиями в габбро эндоконтакта. На данном этапе формировались также хлорит-альбит-кварцевые (пропилитовые) жилы, которые переносили флюид, приводящий к перекристаллизации высокотемпературных ассоциаций. Оценки температуры контактового метаморфизма по хлориту ( $252\text{--}472^\circ\text{C}$ ) и биотиту ( $526\text{--}625^\circ\text{C}$ ) согласуются с минеральными ассоциациями.

### Массоперенос главных и рудных элементов

На рис. 8 представлены геохимические спектры, характеризующие общие закономерности распределения главных и примесных элементов в приконтактовых породах. По мере удаления от контакта в экзоконтактовых породах растут содержания TiO<sub>2</sub>, Sc, Rb, Pb, Th, Nb, ΣРЗЭ, уменьшаются – MnO, Sr, Cr, Cu, Zn. Примерно на одном уровне в экзоконтактовой зоне сохраняются содержания SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Y. Для клинопироксеновых роговиков отмечаются максимальные концентрации CaO, Na<sub>2</sub>O. Максимумы по концентрациям ΣFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, Ni, Cr, Co, Ba и минимумы по P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Zr характерны для гиперстеновых роговиков.



**Рис. 8.** Изменения химического состава пород контактового ореола массива Восточный Бускун по мере удаления от контакта с габбро.

**Fig. 8.** Variations in the chemical composition of contact aureole rocks of Vostochnyi Buskun massif with increasing distance from the contact with gabbro.

Наибольшее содержание сидерофильных и халькофильных элементов характерно для гиперстеновых роговиков (V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn). Содержание компонентов закономерно уменьшается в сторону отдаления от контакта и также превышает таковое в измененных эндоконтактных габбро, что показывает относительно высокую подвижность этих элементов при высокотемпературном диффузионном обмене с вмещающей толщей. Осаждение в непосредственной близости от зоны контакта связано с формированием наиболее высокотемпературных породообразующих фаз, а именно – гиперстена и биотита, которые обычно концентрируют данные элементы. Подтверждением этому служит факт, что метасоматизированные эндоконтактные габбро обеднены сидерофилами и халькофилами по сравнению с неизменными породами центральной части массива (обр. k23-108), которые могли быть источником вещества. При повторном низкотемпературном метасоматозе Cr, Ni, V перераспределяются в качестве примесей в хлорите. Рудная минерализация в гиперстеновых роговиках представлена ильменитом и сульфидами железа, по которым развивается вторичный гетит. Сульфиды и гетит содержат примеси Co, Ni, Cu.

Результаты детального минералого-геохимического исследования показали, что изученные породы контактового ореола безрудны. Учитывая достаточно интенсивный обменный процесс в приконтактной зоне между габброидами и метатерригенными породами, можно сделать вывод о слабом рудоносном потенциале и самого габбрового массива, по крайней мере, непосредственно под контактовой зоной. Присутствие хлора (до 0.4 мас. %) в амфиболе и апатите в породах эндо- и экзоконтакта свидетельствует о его участии в флюидном массопереносе. Известно, что сульфидные минералы активно растворяются в окисленном флюиде в присутствии хлорид-ионов (Sterar et al., 1978; Lu et al., 2000; Liu, Brenan, 2015). Согласно модели эволюции Pt-Pd-несущей Ni-Cu сульфидной минерализации худолазовского комплекса (Rakhimov et al., 2021), массовая гидротермально-метасоматическая проработка пород и руд привела к частичному растворению и переосаждению рудных элементов как в пределах, так и за пределами массивов. Присутствие аксессуарного Pt-содержащего пирротина в роговиках может свидетельствовать лишь о незначительной сульфидоносности нижележащих габбро.

#### **Геологическая модель становления массива Восточный Бускун и формирования контактовой зоны**

По нашим данным, становление массива Восточный Бускун происходило в несколько этапов, а формирование мощного контактового ореола свя-

зано с внедрением водонасыщенных лейкократовых габбро второй фазы. На первом этапе произошло внедрение меланократовых мелкозернистых габбро первой фазы, обедненных летучими компонентами (рис. 9а). Контакт пород первой фазы с вмещающей осадочной толщей мы не наблюдали. На втором этапе произошло внедрение водонасыщенных лейкократовых такситовых габбро, приведших к формированию пород контактового ореола мощностью не менее 20 м. На позднемагматическом этапе проявилась флюидная активизация, образовавшая пегматоидные обособления такситовых лейкогаббро, а также способствовавшая началу диффузионных процессов с формированием небольшой зоны клинопироксеновых роговиков в пределах 0.5 м от контакта. Мощная метасоматическая проработка самих габброидов, по нашему мнению, связана с автометасоматическими процессами, поскольку она не задействует породы вмещающей толщи. Следующий этап (рис. 9б), вероятно, связан с активной тектоникой, фиксируемой по зеркалам скольжения в габброидах и пликативным деформациям в роговиках. На данном этапе произошло внедрение серии порфировых долеритовых даек, рассекающих как породы предшествующих фаз массива, так и вмещающую толщу, и системы разноориентированных инфильтрационных пропиловых жил хлорит-альбит-кварцевого состава. На этом этапе вмещающие породы остались почти не затронутыми метасоматическими процессами, проявленными лишь в небольшом ожелезнении на контакте жил и роговиков, тогда как породы даек сильно метасоматизированы.

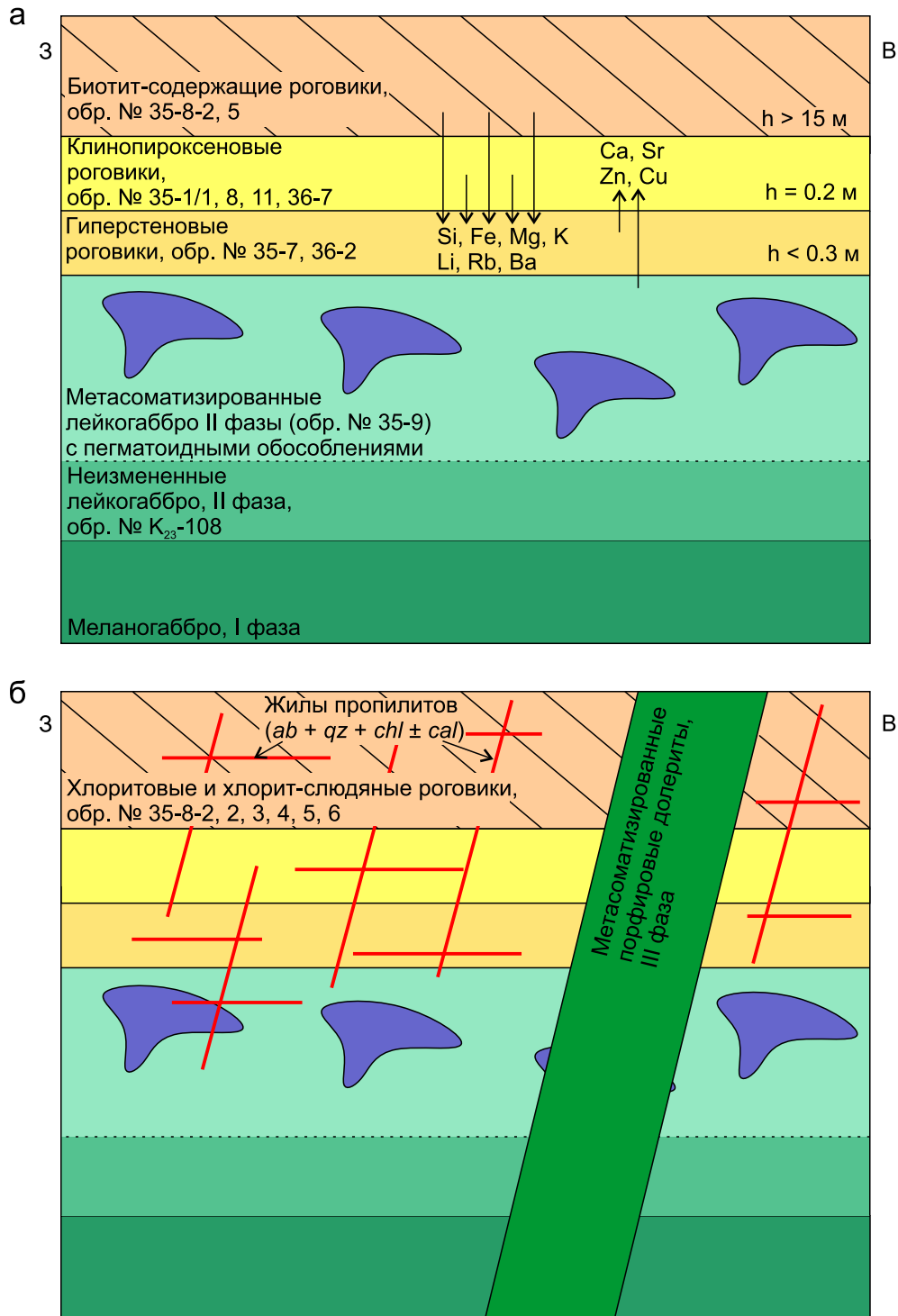
#### **ВЫВОДЫ**

Представленный материал по детальному минералого-геохимическому изучению контактовой зоны массива Восточный Бускун позволяет сделать следующие принципиальные выводы.

1. Массив Восточный Бускун худолазовского дифференцированного комплекса является композитным (многофазным), непосредственно с вмещающей толщей в зоне наблюдения контактируют такситовые лейкократовые оливин-роговообманковые габбро.

2. В пределах приконтактной зоны выделены три главных типа пород: гиперстеновые роговики (беебахитоподобные породы) и клинопироксеновые роговики, непосредственно контактирующие с лейкократовыми габбро, а также хлоритовые и хлорит-слюдяные роговики, характеризующиеся существенными вариациями химического состава и слагающие большую часть экзоконтакта.

3. Минералогическая зональность и данные термометрии позволяют выделить две стадии формирования приконтактной области: высокотемпературный этап (530–620°C) с формированием



**Рис. 9.** Принципиальная схема формирования приконтактовой зоны массива Восточный Бускун и миграции компонентов в разрезе.

а – высокотемпературный этап, б – низкотемпературный этап. Мощности и размеры геологических тел изображены вне масштаба.  $h$  – мощность геологического тела (истинная или видимая); 3 – запад, В – восток. Пунктирными линиями показаны границы зон внутри эндоконтакта.

**Fig. 9.** Schematic diagram of the formation of the Vostochnyi Buskun massif contact zone and the migration of components in the section.

а – high-temperature stage, б – low-temperature stage. The thicknesses and sizes of geological bodies are shown out of scale.  $h$  – thickness of the geological body (true or visible); 3 – west, В – east. The dotted lines show the boundaries inside the endocontact.

гиперстеновых и биотитсодержащих роговиков, пегматоидных обособлений и клинопироксеновых роговиков; низкотемпературный этап (250–460°C), с которым связано внедрение долеритовых даек и кварц-хлорит-альбитовых жил.

4. Особенности массопереноса рудных элементов, в котором участвовал хлорсодержащий флюид, свидетельствуют об отсутствии сульфидных рудных тел под зоной контакта в составе массива Восточный Бускун.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бучковский Э.С., Перминов Г.М., Калташов А.П., Караваев И.Н. (1971ф) Оценка никеленосности основных интрузий Худолазовского комплекса. Отчет о результатах работ, проведенных Худолазовской геолого-поисковой партией в северной части Баймакского и южной части Абзелиловского районов БАССР. Уфа: ГосГеолФонд. Т. 1. Инв. № 8235.
- Бучковский Э.С., Перминов Г.М., Крестинин Б.А., Караваев И.Н., Петров Ю.Н. (1974ф) Оценка никеленосности основных интрузий Худолазовского комплекса. Отчет по объекту “Худолазовская синклиналь. Поиски масштаба 1:50 000 сульфидных медно-никелевых руд” в 8 т. Уфа: ГосГеолФонд. Т. 1, 240 с. Инв. № 9028.
- Брулевская Т.Т., Цыганков А.А., Орсов Д.А. (2003) Контактново-реакционные процессы в Нюрундуканском ультрамафит-мафитовом массиве (Северное Прибайкалье). *Геология и геофизика*, **44**(3), 207-223.
- Горячев Н.А. (2003) Происхождение золото-кварцевых жильных поясов Севера Пацифики. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 143 с.
- Захарова А.А. (1982ф) Петрология и металлогения раннекаменноугольной габбро-плагиогранитной формации на восточном склоне Ю. Урала (худолазовский комплекс). Научный отчет по теме “Условия формирования и метаморфизм магматогенных комплексов Южного Урала” в 3 т. Уфа: ИГ БФ АН СССР. Т. 1, 429 с. Инв. № 10913.
- Знаменский С.Е. (2009) Структурные условия формирования коллизионных месторождений золота восточного склона Южного Урала. Уфа: Гилем, 348 с.
- Классификация и номенклатура метаморфических горных пород. (1992) (Ред. Н.Л. Добрецов, О.А. Богатиков, О.М. Розен). Новосибирск: ОИГГМ, 205 с.
- Кокшина Л.В. (2013) Постдиагенетические преобразования петрокластических граувакк (на примере среднего палеозоя Южного Урала и юга Западной Сибири). Автореф. ... дисс. канд. геол.-мин. наук. Екатеринбург, 23 с.
- Малюкова Н.Н. (2018) Распределение редкоземельной минерализации по типам руд на разведочных горизонтах месторождения Кутессай-II. *Международ. науч.-исслед. журн.*, **6-1**(72), 97-104. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.72.6.019>
- Мухеев Е.И., Рахимов И.Р., Шапаренко Е.О., Сорока Е.И. (2025) Метасоматоз и РЗЭ-минерализация осадочных пород зилаирской свиты в зоне экзоконтакта габбрового массива худолазовского комплекса (Чебаркульская площадь, Южный Урал). *Изв. Томского политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов*, **336**(1), 123-138. <https://doi.org/10.18799/24131830/2025/1/4584>
- Монтин С.А., Левина Н.Б., Батрак И.Е. и др. (2015) Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-6 1:200 000. Изд-е второе. Сер. Южно-Уральская. Лист N-40-XXIX – Сибай. Объяснит. записка. М.: МФ ВСЕГЕИ, 218 с. + 14 вкл. (МПР России, Федеральное агентство по недропользованию, Управление по недропользованию по Челябинской области, ФГУНПП “Аэрогеология”).
- Рахимов И.Р., Анкушева Н.Н., Холоднов В.В. (2020) Со-Рd-Ag и Th-REE минерализация вмещающих пород экзоконтактовой зоны массива Ташлы-Тау Худолазовского комплекса (Южный Урал): условия образования и источники вещества. *Изв. Томского политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов*, **331**(8), 77-91. <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/7/2770>
- Рахимов И.Р., Васильев А.М., Самигуллин А.А. (2024) Условия образования золоторудного проявления Билян-Тау (Худолазовская мульда, Южный Урал). *Вестник Воронежск. гос. ун-та. Сер.: Геол.*, (3), 21-31. <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/3/21-31>
- Ревердатто В.В. (1970) Фации контактового метаморфизма. (Ред. В.С. Соболев). М.: Недра, 272 с.
- Ревердатто В.В., Лиханов И.И., Полянский О.П., Шепелев В.С., Колобов В.Ю. (2017) Природа и модели метаморфизма. (Отв. ред. Н.В. Соболев). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 331 с.
- Салихов Д.Н., Пшеничный Г.Н. (1984) Магматизм и оруденение зоны ранней консолидации Магнитогорской эвгеосинклинали. Уфа: БФАН СССР, 112 с.
- Семёнов И.В., Яковлева О.М. (1994) Роговики юго-восточного обрамления габбрового массива горы Кумба – апогаббровые бластокатаклазиты или экзоконтактовые аповулканогенные образования? *Тр. ИГГ УрО РАН*, вып. 141, 29-34.
- Сервакин И.Б., Знаменский С.Е., Косарев А.М. (2001) Разрывная тектоника и рудоносность Башкирского Зауралья. Уфа: Полиграфкомбинат, 318 с.
- Склярёв Е.В., Лавренчук А.В., Федоровский В.С., Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Котов А.Б., Мазукабов А.М., Старикова А.Е. (2020) Региональный и контактовый метаморфизм и автотематоморфизм Ольхонского террейна, Западное Прибайкалье. *Петрология*, **28**(1), 55-71. <https://doi.org/10.31857/S0869590320010057>
- Фазлиахметов А.М. (2021) Франские граувакки Худолазовской мульды. Сообщение 3. Краткая геохимическая характеристика. *Геол. вестник*, (2), 83-105. <https://doi.org/10.31084/2619-0087/2021-2-7>
- Фролова Т.И., Бурикова И.А. (1997) Магматические формации современных геотектонических обстановок. М.: Изд-во МГУ, 320 с.
- Цабадзе Дж.Э., Гуфранов Р.А., Александров Ю.А., Цабадзе Г.А., Жариков В.Г., Марченко Т.А., Кавыева М.Х. (1984ф) Геологическое строение Сибайского рудного района. Отчет по геологическому доизучению м-ба 1:50 000 Сибайской площади (планшеты N-40-106-B-в, г; N-40-118-A; N-40-118-B; N-40-130-A-а, б) за 1980–1984 гг. в 5 т. Уфа. Т. 1, 271 с. Инв. № 11504.
- Чашин В.В. (2007) Минеральные парагенезисы и условия образования роговиков зоны экзоконтакта Хи-

- бинского щелочного плутона (Кольский полуостров, Россия). *Геохимия*, (1), 19-37.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П. (2000) Основы литохимии. СПб.: Наука, 479 с.
- Barton M.D., Ilchik R.P., Marikos M.A. (1991) Ch. 7. Metasomatism. *Contact metamorphism*. (Eds D.M. Kerrick). Berlin, Boston: De Gruyter, 321-350. <https://doi.org/10.1515/9781501509612-010>
- Boynnton W.V. (1984) Cosmochemistry of Rare Earth Elements: meteorite studies. (Ed. P. Henderson). *Rare Earth Element Geochemistry*, N. Y.: Elsevier, 63-114. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42148-7.50008-3>
- Bucher K. (2023) Petrogenesis of Metamorphic Rocks. Springer, 467 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-12595-9>
- Crerar D.A., Susak N.J., Borcsik M., Schwartz S. (1978) Solubility of the buffer assemblage pyrite + pyrrhotite + magnetite in NaCl solutions from 200 to 350°C. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **42**(9), 1427-1437. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(78\)90048-0](https://doi.org/10.1016/0016-7037(78)90048-0)
- Dasgupta S., Bhowmik S.K. (2021) Types of Metamorphism. *Encyclopedia of Geology*, 2nd ed. (Eds D. Alderton, S.A. Ellias). L.: Academic Press, 354-365. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102908-4.00114-4>
- Kelemen P.B., Hanghøj K., Greene A.R. (2014) One View of the Geochemistry of Subduction-Related Magmatic Arcs, with an Emphasis on Primitive Andesite and Lower Crust. *Treatise on Geochemistry (Second Ed.)*. (Eds H.D. Holland, K.K. Turekian). Elsevier, 749-806. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00323-5>
- Kitsault Molybdenum Project. British Columbia, Canada. NI 43-101 Technical Report on Feasibility Study. (2010) (Prepared by: G. Christie, G. Kulla, R. Ulansky, T. Lipiec, P. Healy, M. Levy, B. Borntraeger). Project No.: 165003, 208 p.
- Lanari P., Wagner T., Vidal O. (2014) A thermodynamic model for di-trioctahedral chlorite from experimental and natural data in the system MgO-FeO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O: applications to P-T sections and geothermometry. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **167**, 968. <https://doi.org/10.1007/s00410-014-0968-8>
- Liu Y., Brenan J. (2015) Partitioning of platinum-group elements (PGE) and chalcogens (Se, Te, As, Sb, Bi) between monosulfide-solid solution (MSS), intermediate solid solution (ISS) and sulfide liquid at controlled fO<sub>2</sub>-fS<sub>2</sub> conditions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **159**, 139-161. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2015.03.021>
- Lu Z.Y., Jeffrey M.I., Zhu Y., Lawson F. (2000) Studies of pentlandite leaching in mixed oxygenated acidic chloride-sulfate solutions. *Hydrometallurgy*, **56**(1), 63-74. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(00\)00067-0](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(00)00067-0)
- Rakhimov I.R., Ankusheva N.N., Samigullin A.A., Shani-na S.N. (2023) Origin and Evolution of Ore-Forming Fluids at the Small-Sized Gold Deposits in the Khudolaz Area, Southern Urals. *Minerals*, **13**(6), 781. <https://doi.org/10.3390/min13060781>
- Rakhimov I.R., Vishnevskiy A.V., Saveliev D.E. (2021) Geochemical evolution of PGE-sulfide mineralization of the Khudolaz differentiated complex in the South Urals: The role of R-factor and hydrothermal alteration. *Ore Geol. Rev.*, 104411. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104411>
- Simakov S.K., Dolivo-Dobrovolsky D.V. (2009) PT Quick: the Program for Estimation of Equilibrium Parameters for Mineral Assemblages Using Methods of Classical Geothermobarometry.
- Sklyarov E.V., Kargopolov S.A., Lavrenchuk A.V., Pushkarev E.V., Semenova D.V. (2023) Geology, Petrology, and Mineralogy of Hornfels-like Rocks (Beerbachite) in the Early Paleozoic Olkhon Collisional Orogen (West Baikal Area, Russia). *Minerals*, **13**(11), 1370. <https://doi.org/10.3390/min13111370>
- Sun S., McDonough W.F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geol. Soc., Lond., Spec. Publ.*, **42**, 313-345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- Taylor S.R., McLennan S.M. (1985) The continental crust: its composition and evolution. Oxford, UK; Blackwell, 349 p. <https://doi.org/10.1002/gj.3350210116>
- Warr L.N. (2021) IMA-CNMNC approved mineral symbols. *Mineral. Mag.*, **85**(3), 291-320. <https://doi.org/10.1180/mgm.2021.43>
- Winter J.D. (2014) Principles of Igneous and Metamorphic Petrology. 2nd ed. Pearson: London, UK, 745 p.
- Wu C.M., Chen H.X. (2015) Revised Ti-in-biotite geothermometer for ilmenite- or rutile-bearing crustal metapelites. *Sci. Bull.*, **60**(1), 116-121. <https://doi.org/10.1007/s11434-014-0674-y>
- Zane A., Weiss Z. (1998) A procedure for classifying rock-forming chlorites based on microprobe data. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, **9**, 51-56. <https://doi.org/10.1007/BF02904455>
- Zou C. (2013) Chapter 8 – Oil and Gas in Metamorphic Reservoirs. *Unconventional Petroleum Geology*. (Ed. C. Zou). Elsevier, 275-305. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397162-3.00008-6>

## REFERENCES

- hornfels in the outer contact zone of the Khibina Massif, Kola Peninsula, Russia. *Geochem. Int.*, **45**(1), 15-31 (translated from *Geokhimiya*, (1), 19-37). <https://doi.org/10.1134/S0016702907010028>
- Classification and nomenclature of metamorphic rocks. Reference manual. (1992) (Eds N.L. Dobretsov, O.A. Bogatikov, O.M. Rosen). Novosibirsk, OIGGM Publ., 205 p. (In Russ.)
- Crerar D.A., Susak N.J., Borcsik M., Schwartz S. (1978) Solubility of the buffer assemblage pyrite + pyrrhotite + magnetite in NaCl solutions from 200 to 350°C. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **42**(9), 1427-1437. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(78\)90048-0](https://doi.org/10.1016/0016-7037(78)90048-0)
- Dasgupta S., Bhowmik S.K. (2021) Types of Metamorphism. *Encyclopedia of Geology, 2nd ed.* (Eds D. Alderton, S.A. Ellias). London, Academic Press, 354-365. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102908-4.00114-4>
- Fazliakhmetov A.M. (2021) Frasnian greywackes of the Khudolaz Syncline. Message 3. Brief description of geochemistry. *Geol. Vestnik*, (2), 83-105. (In Russ.) <https://doi.org/0.31084/2619-0087/2021-2-7>
- Frolova T.I., Burikova I.A. (1997) Magmatic formations of modern geotectonic settings: Tutorial. Moscow, MGU Publ., 320 p. (In Russ.)
- Goryachev N.A. (1998) Geology of Mesozoic Gold Quartz Vein Belts in Northeastern Asia. Magadan, SVKNII DVO RAN Publ., 210 p. (In Russ.)
- Kelemen P.B., Hanghøj K., Greene A.R. (2014) One View of the Geochemistry of Subduction-Related Magmatic Arcs, with an Emphasis on Primitive Andesite and Lower Crust. *Treatise on Geochemistry (Second Ed.)*. (Eds H.D. Holland, K.K. Turekian). Elsevier, 749-806. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00323-5>
- Kitsault Molybdenum Project. British Columbia, Canada. NI 43-101 Technical Report on Feasibility Study. (2010) (Prepared by: G. Christie, G. Kulla, R. Ulansky, T. Lipiec, P. Healy, M. Levy, B. Borntraeger). Project No.: 165003, 208 p.
- Kokshina L.V. (2013) Postdiagenetic transformations of petroclastic graywackes (on the example of the Middle Paleozoic of the Southern Urals and the south of Western Siberia). *Abstr. of Cand. Geol.-Min. Sci.* Ekaterinburg, 23 p. (In Russ.)
- Lanari P., Wagner T., Vidal O. (2014) A thermodynamic model for di-trioctahedral chlorite from experimental and natural data in the system MgO-FeO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O: applications to P-T sections and geothermometry. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **167**, 968. <https://doi.org/10.1007/s00410-014-0968-8>
- Liu Y., Brenan J. (2015) Partitioning of platinum-group elements (PGE) and chalcogens (Se, Te, As, Sb, Bi) between monosulfide-solid solution (MSS), intermediate solid solution (ISS) and sulfide liquid at controlled fO<sub>2</sub>-fS<sub>2</sub> conditions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **159**, 139-161. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2015.03.021>
- Lu Z.Y., Jeffrey M.I., Zhu Y., Lawson F. (2000) Studies of pentlandite leaching in mixed oxygenated acidic chloride-sulfate solutions. *Hydrometallurgy*, **56**(1), 63-74. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(00\)00067-0](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(00)00067-0)
- Malyukova N.N. (2018) Rare-earth mineralization distribution by ore types at exploration horizons of Kutesai-II deposit. *Mezhdunar. Nauchno-Issledov. Zhurnal*, **6-1**(72), 97-104. (In Russ.) <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.72.6.019>
- Mikheev E.I., Rakhimov I.R., Shaparenko E.O., Soroka E.I. (2025) Metasomatism and REE mineralization of the Zilair Formation sedimentary rocks in the Khudolaz complex gabbro massif exocontact zone (Chebarkul area, Southern Urals). *Izv. Tomsk. Politekhn. Universiteta. Inginiring Georesursov*, **336**(1), 123-138. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2025/1/4584>
- Montin S.A., Levina N.B., Batrak I.E. et al. (2015) State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:200,000. Second edition. South Ural Series. Sheet N-40-XXIX – Sibay. Explanatory note. Moscow, MF VSEGEI Publ., 218 p. + 14 incl. (Ministry of Natural Resources of Russia, Federal Agency for Subsoil Use, Subsoil Use Administration for the Chelyabinsk Region, FSUE “Aerogeology”). (In Russ.)
- Rakhimov I.R., Ankusheva N.N., Kholodnov V.V. (2020) Co-Pd-Ag and Th-REE mineralization of host rocks from the exocontact zone of Tashly-Tau massif, Khudolaz complex (South Urals): ore sources and fluid inclusions data. *Izv. Tomsk. Politekhn. Universiteta. Inginiring Georesursov*, **331**(8), 77-91. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/7/2770>
- Rakhimov I.R., Ankusheva N.N., Samigullin A.A., Shaniina S.N. (2023) Origin and Evolution of Ore-Forming Fluids at the Small-Sized Gold Deposits in the Khudolaz Area, Southern Urals. *Minerals*, **13**(6), 781. <https://doi.org/10.3390/min13060781>
- Rakhimov I.R., Vasil'ev A.M., Samigullin A.A. (2024) Formation of the Bilyan-Tau gold ore occurrence (Khudolaz trough, Southern Urals). *Proceedings of Voronezh State University. Ser.: Geology*, (3), 21-31. (In Russ.) <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/3/21-31>
- Rakhimov I.R., Vishnevskiy A.V., Saveliev D.E. (2021) Geochemical evolution of PGE-sulfide mineralization of the Khudolaz differentiated complex in the South Urals: The role of R-factor and hydrothermal alteration. *Ore Geol. Rev.*, 104411. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104411>
- Reverdatto V.V. (1970) Facies of contact metamorphism. (Ed. V.S. Sobolev). Moscow, Nedra Publ., 272 p. (In Russ.)
- Reverdatto V.V., Likhanov I.I., Polyanskii O.P., Sheplev V.S., Kolobov V.Yu. (2017) The nature and models of metamorphism. (Ed. N.V. Sobolev). Novosibirsk, Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 331 p. (In Russ.)
- Salikhov D.N., Pshenichnyi G.N. (1984) Magmatism and mineralization of the early consolidation zone of the Magnitogorsk eugeosyncline. Ufa, BFAN SSSR Publ., 112 p. (In Russ.)
- Semenov I.V., Yakovleva O.M. (1994) Hornfels of the southeastern framing of the gabbro massif of Mount Kumba – apo-gabbro blastoclastites or exocontact apo-volcanogenic formations? *Tr. IGG UB RAS*, vyp. 141, 29-34. (In Russ.)
- Seravkin I.B., Znamenskii S.E., Kosarev A.M. (2001) Fracture tectonics and ore content of the Bashkir Trans-Urals. Ufa, Poligrafkombinat Publ., 318 p. (In Russ.)
- Simakov S.K., Dolivo-Dobrovolsky D.V. (2009) *PT Quick: the Program for Estimation of Equilibrium Parameters for Mineral Assemblages Using Methods of Classical Geothermobarometry*.
- Sklyarov E.V., Kargopolov S.A., Lavrenchuk A.V., Pushkarev E.V., Semenova D.V. (2023) Geology, Petrology,

- and Mineralogy of Hornfels-like Rocks (Beerbachite) in the Early Paleozoic Olkhon Collisional Orogen (West Baikal Area, Russia). *Minerals*, **13**(11), 1370. <https://doi.org/10.3390/min13111370>
- Sklyarov E.V., Lavrenchuk A.V., Fedorovsky V.S., Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Kotov A.B., Mazukabzov A.M., Starikova A.E. (2020) Regional, Contact Metamorphism, and Autometamorphism of the Olkhon Terrane (West Baikal Area). *Petrology*, **28**, 47-61 (translated from *Petrologiya*, **28**(1), 55-71). <https://doi.org/10.1134/S0869591120010051>
- Sun S., McDonough W.F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geol. Soc., Lond., Spec. Publ.*, **42**, 313-345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- Taylor S.R., McLennan S.M. (1985) The continental crust: its composition and evolution. Oxford, UK; Blackwell, 349 p. <https://doi.org/10.1002/gj.3350210116>
- Tsabadze Dzh.E., Gufranov R.A., Aleksandrov Yu.A., Tsabadze G.A., Zharikov V.G., Marchenko T.A., Kavayeva M.Kh. (1984f) Geological structure of the Sibay ore region. Report on additional geological study at a scale of 1:50,000 of the Sibay area (tablets N-40-106-B-v, g; N-40-118-A; N-40-118-B; N-40-130-A-a, b) for 1980–1984 in 5 volumes. Ufa, V. 1, 271 p. (In Russ.)
- Vrublevskaya T.T., Tsygankov A.A., Orsoev D.A. (2003) Contact processes in the Nyurundukan ultramafic-mafic massif (northern Baikal region). *Russ. Geol. Geophys.*, **44**(3), 205-223 (translated from *Geol. Geofiz.*, **44**(3), 207-223).
- Warr L.N. (2021) IMA–CNMNC approved mineral symbols. *Mineral. Mag.*, **85**(3), 291-320. <https://doi.org/10.1180/mgm.2021.43>
- Winter J.D. (2014) Principles of Igneous and Metamorphic Petrology. 2nd ed. Pearson: London, UK, 745 p.
- Wu C.M., Chen H.X. (2015) Revised Ti-in-biotite geothermometer for ilmenite- or rutile-bearing crustal metapelites. *Sci. Bull.*, **60**(1), 116-121. <https://doi.org/10.1007/s11434-014-0674-y>
- Yudovich Ya.E., Ketris M.P. (2000) Fundamentals of Lithochemistry. St.Petersburg, Nauka Publ., 479 p. (In Russ.)
- Zakharova A.A. (1982f) Petrology and metallogeny of the Early Carboniferous gabbro-plagiogranite formation on the eastern slope of the Southern Urals (Khudolazovsky complex). Scientific report on the topic “Conditions of formation and metamorphism of igneous complexes of the Southern Urals” in 3 volumes. Ufa, IG BF AN SSSR Publ. V. 1, 429 p. (In Russ.)
- Zane A., Weiss Z. (1998) A procedure for classifying rock-forming chlorites based on microprobe data. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, **9**, 51-56. <https://doi.org/10.1007/BF02904455>
- Znamenskii S.E. (2009) Structural conditions for the formation of collisional gold deposits on the eastern slope of the Southern Urals. Ufa, Gilem Publ., 348 p. (In Russ.)
- Zou C. (2013) Chapter 8 – Oil and Gas in Metamorphic Reservoirs. *Unconventional Petroleum Geology*. (Ed. C. Zou). Elsevier, 275-305. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397162-3.00008-6>