

УДК 552.11

DOI: 10.24930/2500-302X-2026-26-3-631-656

Петрогенезис и рудная специализация такситовых габбро поздневизейского худолазовского дифференцированного комплекса Южного Урала

И. Р. Рахимов^{1,2}¹Институт геологии УФИЦ РАН, 450077, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 16/2²Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, 620110, г. Екатеринбург, ул. Академика Вонсовского, 15

Поступила в редакцию 12.12.2025 г., принята к печати 17.04.2026 г.

Объект исследования. Мелкие интрузии такситовых габбро, широко представленные в составе худолазовского дифференцированного комплекса на Южном Урале. Впервые изучены интрузии, локализованные вне Худолазовской мульды. **Цель исследования.** Реконструкция условий петрогенезиса такситовых габбро, выявление причин их петрографической неоднородности и определение рудной специализации. **Методы.** Использованы методы изучения валового химического состава штучных образцов из естественных обнажений и керна – рентгенофлуоресцентный анализ и масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой. Определен изотопный состав Sr и Nd при помощи термоионизационной масс-спектрометрии с изотопным разбавлением. Состав минералов изучен на сканирующем электронном микроскопе и микрозондах с волновой дисперсионной спектроскопией. Для реконструкции исходного расплава использована программа Comagmat 3.75, для расчетов степени коровой контаминации применена программа FC-AFC-FCA and mixing modeler. **Результаты и выводы.** Согласно петрографическим характеристикам выделено три типа такситовых габбро: 1) пятнистые, в том числе шлировые, 2) пятнисто-полосчатые, 3) гибридные. Они почти не различаются по составу минералов и валовой геохимии, что указывает на единый источник расплава. Возникновение такситовых текстур во многом обусловлено водонасыщенностью исходного расплава и динамикой его внедрения по разрывным нарушениям при синедвиговой тектонике. Неоднородное распределение меланократовых и лейкократовых обособлений происходило при неоднократном поступлении расплава в ограниченную по размерам интрузивную камеру и возникновении участков с разной степенью вязкости и закристаллизованности. Валовые геохимические характеристики пород вместе с изотопным составом Sr (0.70319–0.70396) и Nd ($\epsilon Nd_{(330)} = +4.59 \dots +6.72$) указывают на мантийный источник со смешанным типом между примитивной мантией и мантией надсубдукционного клина. Расчеты показали, что расплав мог быть до 7% контаминированным вмещающими породами из Магнитогорского островодужного террейна, что не сильно искажало условия кристаллизации первичной магмы. По данным моделирования первичного расплава и термобарометрии по роговой обманке, расплав кристаллизовался в диапазоне температур $\approx 1200 \dots 900^\circ\text{C}$ и давлении 2–5 кбар при начальном содержании воды >0.5 мас. %. Такситовые габбро худолазовского комплекса имеют слабый рудный потенциал со специализацией на Ti-Fe оруденение в отличие от более ранних однородных ультрабазит-базитов комплекса, специализированных на сульфидное Cu-Ni-PGE оруденение.

Ключевые слова: худолазовский дифференцированный комплекс, петрология, геохимия, такситовое габбро, кристаллизация, мантия, контаминация, рудная специализация

Источник финансирования

Исследование выполнено за счет государственных заданий ИГ УФИЦ РАН № FMRS-2025-0015 и ИГГ УрО РАН (№ госрегистрации 123011800009-9)

Petrogenesis and ore mineralization of taxitic gabbros from the Late Visean Khudolaz differentiated complex in the Southern Urals

Ildar R. Rakhimov^{1,2}¹Institute of Geology, UFRS RAS, 16/2 Karl Marx st., Ufa 450077, Russia²A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS, 15 Academician Vonsovsky st., Ekaterinburg 620110, Russia

Received 12.12.2025, accepted 17.04.2026

Для цитирования: Рахимов И.Р. (2026) Петрогенезис и рудная специализация такситовых габбро поздневизейского худолазовского дифференцированного комплекса Южного Урала. *Литосфера*, 26(3), 631–656. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2026-26-3-631-656>. EDN: DCKADA

For citation: Rakhimov I.R. (2026) Petrogenesis and ore mineralization of taxitic gabbros from the Late Visean Khudolaz differentiated complex in the Southern Urals. *Lithosphere (Russia)*, 26(3), 631–656. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2026-26-3-631-656>. EDN: DCKADA

Research subject. Small taxitic gabbro intrusions that are widespread within the Khudolaz differentiated complex of the Southern Urals. This study is the first to investigate intrusions located outside the Khudolaz Trough. **Aim.** To reconstruct the petrogenetic conditions of taxitic gabbro formation, to identify the causes of their petrographic heterogeneity, and to determine their ore specialization. **Methods.** The bulk chemical composition of hand-selected samples collected from natural outcrops and drill core was determined by X-ray fluorescence analysis and inductively coupled plasma mass spectrometry. Sr and Nd isotopic compositions were measured by thermal ionization mass spectrometry using the isotope dilution method. Mineral compositions were studied using a scanning electron microscope and microprobes with wavelength-dispersive spectroscopy. Comagmat 3.75 software was used to reconstruct the parental melt, and FC-AFC-FCA and a mixing modeler were used to calculate the degree of crustal contamination. **Results and conclusions.** Based on petrographic characteristics, three types of taxitic gabbros were distinguished: (1) patchy, including schlieren varieties; (2) patchy-banded; and (3) hybrid. These types are virtually similar in mineral composition and bulk geochemistry, indicating a common melt source. The development of taxitic textures was largely associated with the water saturation of the initial melt and the dynamics of its emplacement along faults during strike-slip tectonics. The heterogeneous distribution of melanocratic and leucocratic segregations occurred during repeated melt inputs into a limited-sized intrusive chamber, creating domains with varying degrees of viscosity and crystallization. The bulk geochemical characteristics of the rocks, together with the isotopic composition of Sr (0.70319–0.70396) and Nd ($\epsilon\text{Nd}_{(330)}$ from +4.59 to +6.72), indicate a mantle source of mixed origin between the primitive mantle and the suprasubduction wedge mantle. Calculations showed that the melt underwent up to 7% contamination by host rocks of the Magnitogorsk island-arc terrane, a level insufficient to distort the crystallization conditions of the primary magma. The reconstruction of the primary melt and hornblende thermobarometry indicate crystallization at temperatures of approximately 1200–900°C and pressures of 2–5 kbar with an initial water content exceeding 0.5 wt %. The taxitic gabbros of the Khudolaz complex exhibit limited ore potential with a specialization in Ti–Fe mineralization. This contrasts with the earlier homogeneous ultramafic–mafic rocks of the complex, which are prospective for sulfide Cu–Ni–PGE mineralization.

Keywords: Khudolaz differentiated complex, petrology, geochemistry, taxitic gabbro, crystallization, mantle, contamination, ore specialization

Funding information

The study was supported by State assignments of the Institute of Geology of the Ural Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (No. FMRS-2025-0015) and the Institute of Geology and Geophysics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (State Registration No. 123011800009-9)

ВВЕДЕНИЕ

Дифференцированные, в том числе расслоенные, ультрамафит-мафитовые интрузивные комплексы различных складчатых областей включают такситовые габбро (ТГ) – породы с явно выраженным неравномерным распределением слагающих минеральных зерен пятнистого или полосчатого облика. Термин “такситовая” в петрографии относится к текстуре и часто просто отождествляется с термином “неоднородная” (Смолякин, 2003). Иногда такситовыми называют и порфиоровые породы, однако чаще к типично такситовым относят породы с явно выраженными меланократовыми и лейкократовыми обособлениями, нерегулярными по морфологии и характеру распределения. К примеру, ТГ широко распространены в массивах Платиноносного пояса Урала (Ефимов, Потапова, 2003; Михайлов и др., 2021) и интрузиях Норильского рудного района (Золотухин, 1963, 1964; Рябов, 1969; Служеникин и др., 2018; Чайка, 2023; Криволицкая и др., 2025). В этих породах нередко

локализованы богатые сульфидные скопления, а их происхождение обычно связывают с флюидным воздействием (Годлевский, 1959; Роговер, 1959; Золотухин, 1963, 1997; Служеникин и др., 2018), однако конкретный механизм возникновения такситовой (и атакситовой) текстуры является дискуссионным. Актуальность настоящей статьи обусловлена существующими неопределенностями в проблеме происхождения ТГ, неоднозначностью применения в современной литературе этого термина и накоплением нового материала по одному из типовых объектов Южного Урала.

В центральной части Южного Урала известен крупный по площади распространения и по количеству интрузий худолозовский дифференцированный комплекс (специализированный на сульфидное Cu–Ni–PGE оруденение), в котором отдельные ультрамафитовые или мафитовые тела имеют расслоенность, а наиболее распространенными породами являются ТГ (Rakhimov et al., 2025). ТГ по текстурным признакам легко отличаются в условиях полевой геологии от многих других типов

габброидов, развитых совместно, широкая вариативность минерального и химического состава ТГ проявляется только при детальном лабораторном изучении, внешне образцы неразличимы. Согласно многофазной модели формирования худолазовского дифференцированного комплекса (ХДК), ТГ отвечают поздней фазе и имеют слабый потенциал в отношении сульфидного оруденения (Rakhimov et al., 2025). Однако часть ТГ обогащена Ti и несовместимыми микроэлементами относительно более ранних меланократовых габбро, что указывает на их, возможно, иной металлогенический потенциал. Кроме того, именно ТГ имеют наибольшее площадное распространение. В настоящей статье рассмотрены разновидности такситовых габбро ХДК, их геологическое положение, механизмы образования, условия кристаллизации и металлогенический потенциал.

РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ

Худолазовский комплекс локализован в средней части Западно-Магнитогорской зоны – западной части Магнитогорского островодужного террейна (МОДТ), надвинутой на окраину палеоконтинента Лавруссия (Пучков, 2010). МОДТ является одной из главных структурных единиц Южного Урала (рис. 1а), формировавшейся на протяжении почти всего девона, начиная от субдукции внутри Палеоуральского океана (конец раннего девона) и завершая коллизией с Лавруссией (конец позднего девона) (Brown et al., 2006). Абсолютное большинство интрузий ХДК выявлено и изучено внутри Худолазовской синклинали, где отмечаются сотни мелких тел – хонолитов, штоков, даек, силлов (Rakhimov et al., 2025). На геологической карте (рис. 1б) показана схема опробования интрузий, а на карте Худолазовской мульды (рис. 2) отображена морфология многочисленных мелких интрузий в плане с указанием исследованных участков. Размеры этих интрузий не более 3.5×0.5 км в плане, обычно в районе $(0.3–0.5) \times (0.05–0.1)$ км (рис. 1в, г). Худолазовская синклиналь размером около 40×20 км представляет собой асимметричную мульду с наклоном западного крыла $20–30^\circ$, а восточного – $30–40^\circ$ (Салихов, Пшеничный, 1984). Мульда сложена среднепозднедевонскими вулканогенно-осадочными комплексами, формировавшимися в течение надсубдукционной стадии развития. Согласно (Знаменский, Знаменская, 2009), Худолазовская мульда является частью Худолазовского мегадуплекса растяжения, развивавшегося в условиях транспрессионного тектонического режима. Мегадуплекс изнутри нарушен мелкими разломами север-северо-восточного и северо-западного простирания, ядро мульды смято в пологие антиформные и синформные складки северо-восточного простирания, характерные для лево-

сдвиговых зон. Вдоль магистральных разломов, по которым происходили левосторонние движения, локализовано множество мелких интрузий ХДК.

Изучение геологического строения и структурный контроль интрузий ХДК наиболее детально осуществлены в 1960–1970-е гг. при поисково-разведочных работах на Худолазовской площади (Бучковский и др., 1975), сопровождавшихся бурением и проходкой канав, а также геофизической съемкой (магниторазведкой и гравиразведкой). В результате установлено, что в пределах Худолазовской мульды встречаются дифференцированные, расслоенные и груборасслоенные массивы, а также многоярусные интрузии, соединенные узкими рукавами. Наиболее крупные тела приурочены к ослабленным зонам и разломам. Д.Н. Салихов считал, что интрузии в плане имеют геометрически правильные контуры, и объяснял это приуроченностью к разрывным нарушениям (Салихов, Пшеничный, 1984). Недавними исследованиями нашего научного коллектива такая морфология не подтверждена, а также выяснено, что ряд крупных массивов являются не расслоенными, а композитными (многофазными) (Rakhimov et al., 2025).

Интрузии ТГ, относящиеся к ХДК, развиты и вне Худолазовской мульды в разных структурных зонах (см. рис. 1б): 1) к северу в 30 км от Худолазовской мульды, в пределах Чебаркульской моноклинали; 2) к юго-западу от мульды в 10–30 км вдоль Талкаско-Сосновского разлома и в Таналькской антиклинали (Бузавлыкская площадь); 3) к югу в 30–50 км от мульды в Уртазымском поднятии и Уртазымской мульде. Их вмещающими породами являются в основном тефроида и аргиллиты биягодинской и зилаирской свит позднего девона. Размеры интрузий не позволяют показать их в масштабе геологической карты (см. рис. 1б), на которой размечены точки пробоотбора. Кроме того, например, к востоку от Уртазымской мульды, в Восточно-Магнитогорской зоне, в составе Богдановского полифацального массива участвуют ТГ, близкие по вещественному составу и предполагаемому возрасту (Тевелев и др., 2009) к ТГ ХДК.

Время формирования ХДК оценивается в диапазоне 336–325 млн лет согласно U-Pb датированию циркона методом ЛА ИСП МС и ИД ТИМС из габбро и диоритов Худолазовской мульды (Рахимов, 2025). Этот диапазон во многом перекрывается с визейским веком раннего карбона.

МЕТОДИКА

Изученные интрузии и образцы

Полевые геологические работы с отбором образцов проводились в период с 2013 по 2024 гг. Уточнены положения интрузий, состав *in situ* вмещающих пород, а также исключен ряд геологиче-

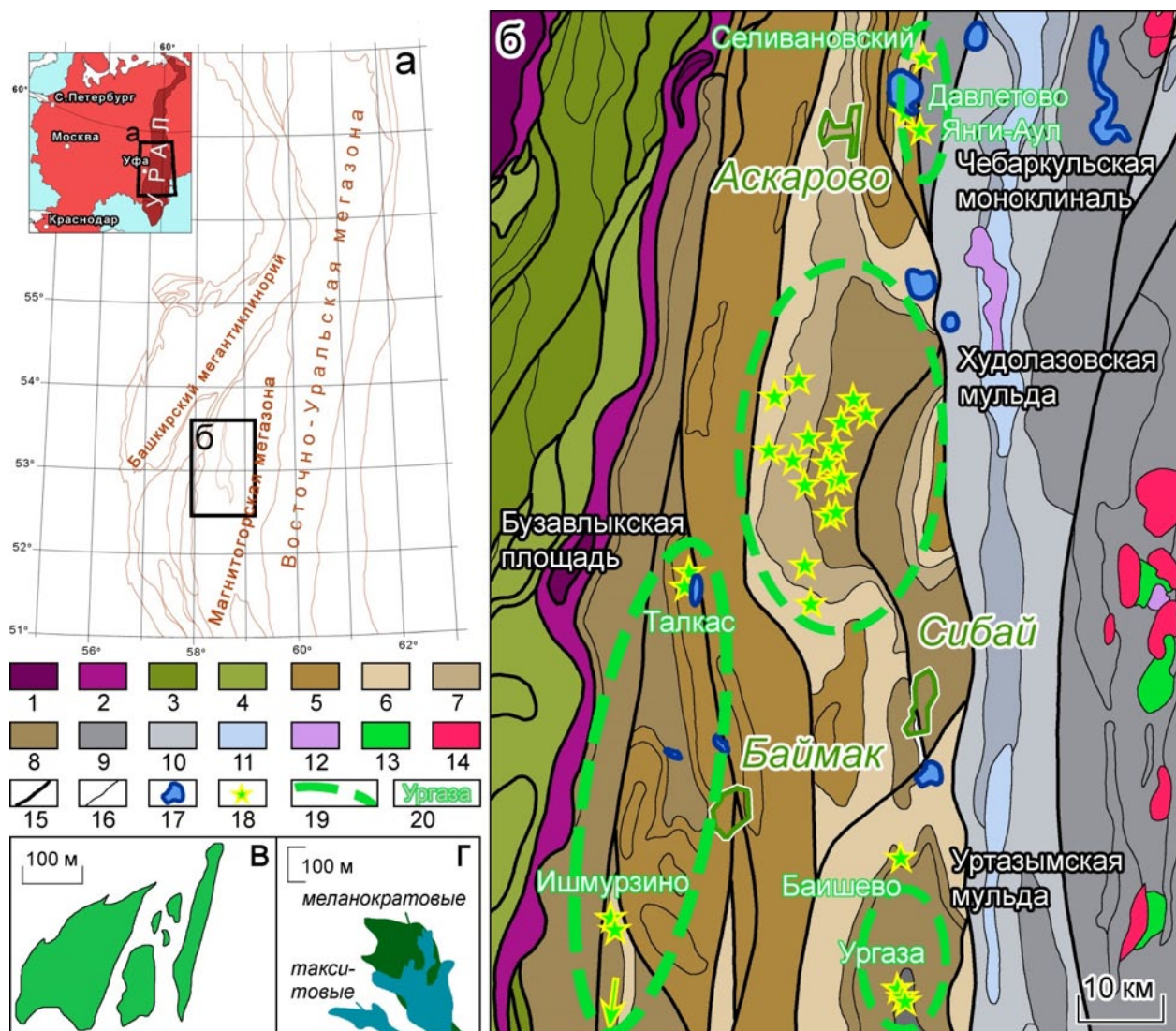


Рис. 1. Структурно-геологическая схема Южного Урала, по (Знаменский, 2009) (а), фрагмент геологической карты N-40, по (Князев, 2011) с упрощениями автора и схемой опробования интрузий (б) и схематические примеры типовых форм интрузий такситовых габбро худолазовского комплекса в плане (в) и разрезе (г).

1 – габбро-перидотитовые комплексы (Кракинский и Сакмарский), 2 – серпентинитовый меланж, 3 – суваянский комплекс (O_{1-3}) кварцитов и сланцев, 4 – максютовский комплекс ($RF_2?$) кварцитов и сланцев, 5 – вулканиты и туфы раннедевонские островодужные, 6 – вулканиты и туфы среднедевонские островодужные, 7 – терригенно-туфогенные комплексы среднедевонские, 8 – терригенно-туфогенные комплексы позднедевонские, 9 – вулканиты и терригенно-карбонатные комплексы раннекарбонные, 10 – вулканиты и терригенно-карбонатные комплексы среднекарбонные, 11 – терригенно-карбонатные комплексы позднекарбонные, 12 – терригенные отложения мезозойские, 13 – габбровые комплексы раннекарбонные, 14 – гранитовые комплексы раннекарбонные, 15 – границы геологические, 16 – водоемы, 17 – точки пробоотбора, 18 – границы изученных площадей, 19 – названия участков скопления интрузий.

Fig. 1. Structural-geological scheme of the Southern Urals according to (Znamenskii, 2009) (a), fragment of geological map N-40 according to (Knyazev, 2011) with simplifications by the author with a scheme for sampling intrusions (b) and examples of typical forms of the Khudolaz complex taxitic gabbro intrusions in plan (v) and in section (r).

1 – gabbro-peridotite complexes (Kraka and Sakmara), 2 – serpentinite mélangé, 3 – Suvanyak complex (O_{1-3}) of quartzites and schists, 4 – Maksyut complex ($RF_2?$) of quartzites and schists, 5 – Early Devonian island-arc volcanics and tuffs, 6 – Middle Devonian island-arc volcanics and tuffs, 7 – Middle Devonian terrigenous-tuffaceous complexes, 8 – Late Devonian terrigenous-tuffaceous complexes, 9 – Early Carboniferous volcanics and terrigenous-carbonate complexes, 10 – Middle Carboniferous volcanics and terrigenous-carbonate complexes, 11 – Late Carboniferous terrigenous-carbonate complexes, 12 – Mesozoic terrigenous deposits, 13 – early Carboniferous gabbro complexes, 14 – early Carboniferous granite complexes, 15 – tectonic boundaries, 16 – geological boundaries, 17 – water, 18 – sampling points, 19 – boundaries of the studied areas, 20 – names of intrusion assemblage sites.

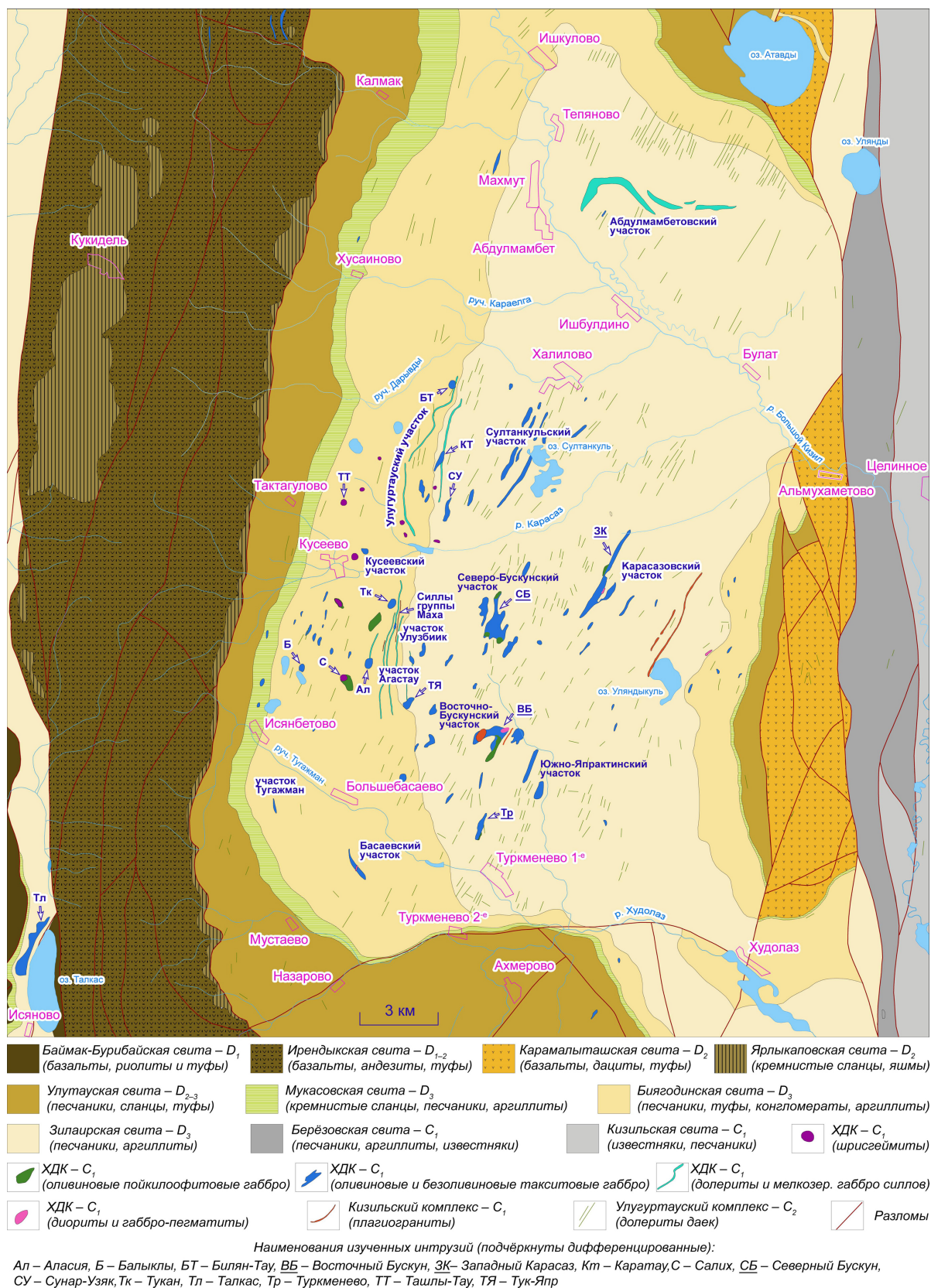


Рис. 2. Геологическая карта Худолазовской мульды, по (Rakhimov et al., 2025).

Fig. 2. Geological map of the Khudolaz Trough after (Rakhimov et al., 2025).

ских тел из рассмотрения их в составе ХДК, отображенных на государственных геологических картах (Монтин и др., 2015а, б), поскольку ими оказались туфогенные породы островодужного террейна. Для данной статьи использованы около 100 образцов габбро.

Петрографические и минералогические исследования проведены с использованием методов оптической (поляризационный микроскоп Altami Polar 3) и электронной (сканирующий электронный микроскоп Tescan Vega Compact (Чехия), оснащенный ЭДС-детектором Oxford Energy) микроскопии в ИГ УФИЦ РАН (г. Уфа). Рентгеноспектральные микроанализы проводились при напряжении 20 кВ и токе зонда 3.7–4 нА.

Валовая элементная и изотопная геохимия пород

Рентгенофлуоресцентный анализ проведен на энергодисперсионном спектрометре Xenometrix X-Calibur (Израиль) 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 выполнено на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой Agilent 7500cx, Agilent Technologies (США) в ТРЦКП (г. Томск). Вскрытие проб проводилось в смеси фтороводородной и азотной кислот с использованием микроволновой печи.

Изотопные Sm-Nd и Rb-Sr исследования методом изотопного разбавления проведены в Центре коллективного пользования “Кольский центр геохронологических и изотопно-геохимических исследований” ФИЦ КНЦ РАН. Измерения изотопного состава Nd и концентраций Sm и Nd проводились на 7-канальном масс-спектрометре Finnigan-MAT 262 (RPQ) (США) в статическом двухленточном режиме с использованием Re и Ta лент. Воспроизводимость и корректность анализов контролировались серией измерений стандарта JNdi-1 (Tanaka et al., 2000), среднее значение отношения $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ которого за период измерений составило 0.512126 ± 7 (2 σ , N = 5). Ошибка в $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ отношениях составляет 0.4% (2 σ) – среднее значение из восьми измерений в стандарте BCR-2 (Raczek et al., 2003). Погрешность измерения изотопного состава Nd в индивидуальном анализе не превышала 0.004%. Холостое внутрилабораторное загрязнение по Nd равно 0.3 нг и по Sm – 0.06 нг. Изотопные отношения нормализованы по отношению $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$, а затем скорректированы на принятое отношение $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ в стандарте JNdi-1 = 0.512115 (Tanaka et al., 2000). При расчете величин $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$ использованы значения однородно-

го хондритового резервуара CHUR по (Bouvier et al., 2008) ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512630$, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.1960$).

Изотопный состав Sr и концентрации Rb и Sr измерены на масс-спектрометре МИ-1201-Т (СССР) в одноленточном режиме на Ta лентах. Изотопный состав Sr во всех измеренных образцах нормализован по величине, рекомендованной NIST SRM-987 и равной 0.71034 ± 0.00026 . Погрешности изотопного состава (95%-й доверительный интервал) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ не превышают $\pm 0.04\%$, определения $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ отношений $\pm 1.0\%$. Точность определения концентраций Rb и Sr $\pm 1.0\%$. Холостое внутрилабораторное загрязнение по Rb равно 2.5 нг и по Sr – 1.2 нг.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Геологическое положение интрузий такситовых габбро

Ранее ТГ рассматривались как неотъемлемая часть единых интрузий варьирующего состава, многофазность этих интрузий обосновывалась не по вещественному составу, а по текстурам пород (Бучковский и др., 1975). Взаимоотношения породных ассоциаций ХДК наиболее наглядны в карьерах, вскрытых в последние десятилетия для добычи облицовочного камня. Так, в карьерах Северный Бускун и Восточный Бускун хорошо видно, что ТГ в виде жил и интрузий различной морфологии прорывают однородные меланократовые габбро (рис. 3а, б). Схематично это показано на рис. 1г. Над кровлей интрузии меланократовых габбро в составе массива Восточный Бускун залегает интрузия ТГ. Там же выявлены разнообразные по облику ТГ, обусловленные неравномерными обособлениями меланократовой и лейкократовой составляющих. При разведочных работах в 1960–1970-е гг. тела ТГ были пересечены большинством скважин, а в вариациях текстурного облика, минерального и химического состава ясных закономерностей не обнаружено (Бучковский и др., 1975). В целом интрузии ТГ, как самостоятельные, так и в составе дифференцированных массивов, представляют собой ветвящиеся тела чаще удлиненной формы, но с резкими вариациями по мощности и толщине (см. рис. 1в, г). Внутри Худолозовской мульды (см. рис. 2) в большом количестве развиты отдельные мелкие и средние интрузии, полностью сложенные ТГ. Также установлено, что некоторые однородные хонолиты залегают вдоль линий простираения силлов (в особенности в западном борту мульды, где развита серия силлов под названием “группа Маха”), сложенных породами, по вещественному составу не отличимы от первых (Rakhimov et al., 2025). Таким образом, проявление “такситовости” во многом связано с размерами интрузии.

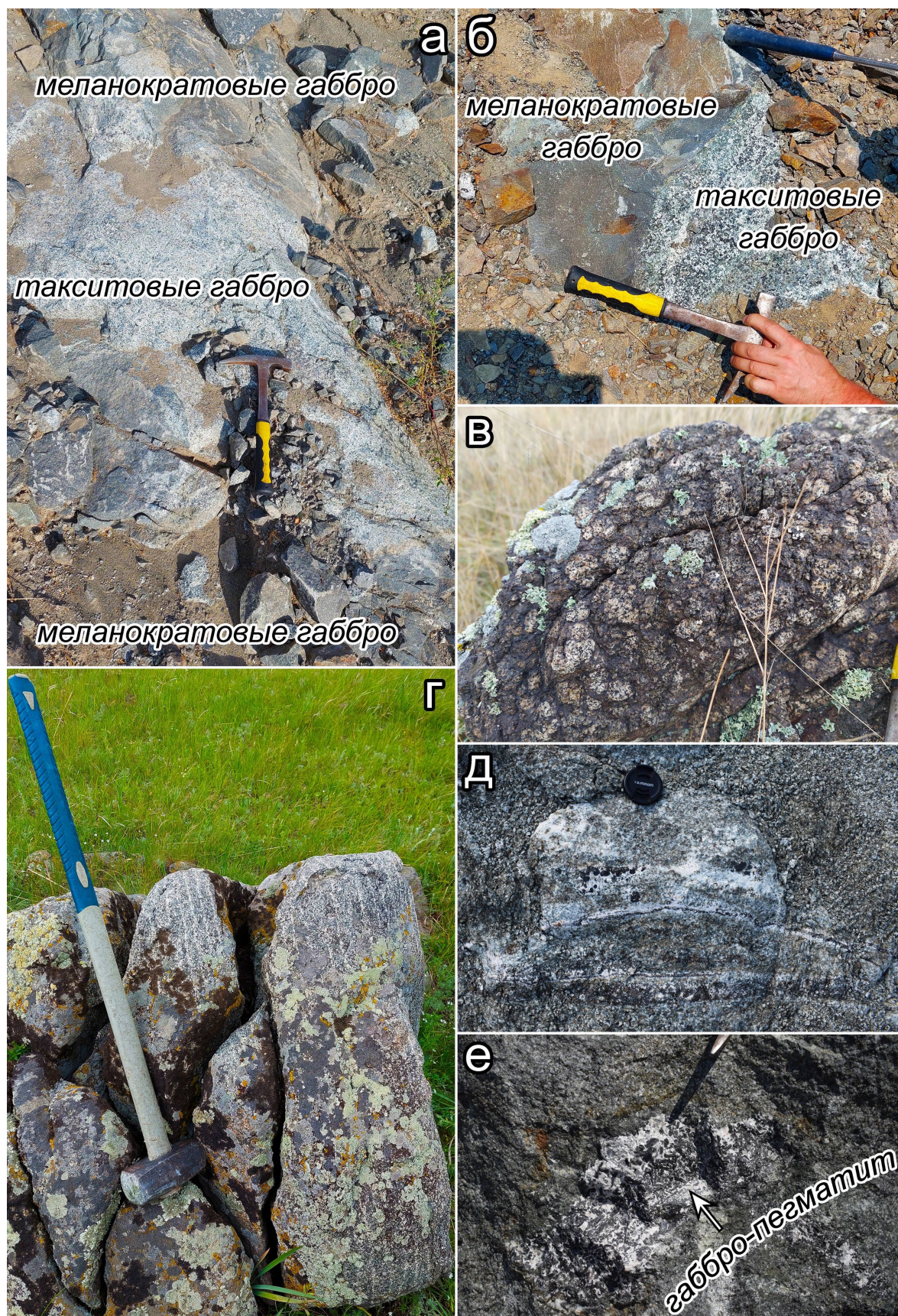


Рис. 3. Скальные обнажения такситовых и такситоподобных габбро худолазовского комплекса.

а – внедрение такситовых габбро в однородные меланократовые габбро (карьер Северный Бускун), б – внедрение такситовых габбро в однородные меланократовые габбро (карьер Восточный Бускун), в – псевдоорбикулярное габбро массива Уртазымской мульды, г – полосчатое габбро (эффект “вертикальной расслоенности”) массива Кусеевского участка, д – пятнисто-полосчатое габбро (карьер Восточный Бускун), е – обособление габбро-пегматита в такситоподобном габбро (карьер Восточный Бускун).

Fig. 3. Rock outcrops of the Khudolaz complex taxitic and taxitic-like gabbro.

а – injection of taxitic gabbro into homogeneous melanocratic gabbro (Severnyi Buskun quarry), б – injection of taxitic gabbro into homogeneous melanocratic gabbro (Vostochnyi Buskun quarry), в – pseudo-orbicular gabbro of the Urtazym trough massif, г – banded gabbro (“vertical layering” effect) of the Kuseevo site massif, д – patchy-banded gabbro (Vostochnyi Buskun quarry), е – gabbro-pegmatite segregation in taxitic-like gabbro (Vostochnyi Buskun quarry).

Петрографическая и минералогическая характеристика такситовых габбро

Такситовый облик, т. е. неоднородное распределение слагающих зерен (здесь не рассматриваются ясно порфиоровые разности) имеют большинство пород худолозовского комплекса. Очевидную такситовую и атакситовую текстуру имеют многие среднезернистые лейкократовые или мезократовые габбро (рис. 4). Но такая текстура при детальном рассмотрении нередко присутствует и в мелкозернистых габбро, и в меланократовых габбро, и в амфиболовых перидотитах. “Такситовость” в них ввиду неконтрастной окраски различить сложно, поэтому в данной статье подробно рассмотрены наиболее очевидные по визуальному критерию такситовые габброиды. Все они являются амфиболовыми (роговообманковыми). Кроме ТГ в ХДК распространены однородные (массивные) меланократовые габбро, кристаллизовавшиеся из другого (более сухого) расплава, нежели ТГ (Rakhimov et al., 2025), а также другие нетакситовые породы – шприсгеймиты, диориты, долериты. Последние слагают краевые части массивов или маломощные тела и могут происходить из того же расплава, что и ТГ.

Петрографические исследования позволили автору выделить три типа ТГ ХДК: 1) пятнистые, в частности шлировые, габбро (на сленге горноработчиков – рябчиковые габбро), иногда довольно однородные с не всегда явной в них “такситовостью” (такситоподобные), но всегда выраженной в неравномерном распределении пятен и нерегулярной их морфологии (см. рис. 4а, г, е–и); 2) пятнисто-полосчатые и неравномерно-полосчатые габбро, “такситовость” явная (см. рис. 3д, рис. 4б); 3) пятнисто-полосчатые гибридные габбро (контраминированные), “такситовость” явная, но нетипичная (см. рис. 4в).

Первый тип (ТГ I) – наиболее распространенный, встречается на всех изученных площадях. Ими сложены многие массивы однородного строения. Часто породы метасоматизированы (рис. 5а, б), и в этом случае их окраска либо светлее, либо темнее, чем у свежих габбро. Структура породы в одном образце может меняться от габбровой до пойкилоофитовой. Характерны шлиры и

шлироподобные образования фемического и салического состава. Фемические сростки образованы оливином, клинопироксеном и роговой обманкой (рис. 5в, г). В безоливиновых габбро встречаются ильменит-роговообманковые шлиры (см. рис. 4а). Салические шлиры и шлироподобные сростания выполнены плагиоклазом (чаще всего измененным), иногда с калиевым полевым шпатом и кварцем. Среди ТГ I в интрузиях Уртазымской мульды обнаружены псевдоорбикулярные габбро – породы с неравномерной наложенной эпидотизацией, в связи с которой сформировались интенсивно измененные и незатронутые участки (см. рис. 3в). В одних случаях не затронутые эпидотизацией участки имеют шарообразную форму, похожую на орбикулы (см. рис. 4д). В других случаях незатронутые участки имеют непостоянные формы, и тогда порода имеет шлировидный облик.

Второй тип (ТГ II) встречен в композитных массивах, где наблюдаются сложные взаимоотношения между отдельными внедрениями расплава, и в одном из тел неясного строения (вероятно, тоже многофазного). Полосчатость выражена в обособлении лейкосом и меланосом, которое встречается спонтанно в теле ТГ I. Также выявлены участки “вертикальной расслоенности” с полосами плагиоклазового и клинопироксен-роговообманкового состава (см. рис. 3г), которые могут представлять собой продукт взаимодействия многочисленных порций расплава. Такой же тип расслоенности отмечен в интрузии Кортадерас (Центральное Чили), объясняется взаимодействием разных порций магм из разных источников (Higgins, Morata, 2019). Кроме того, в композитных массивах внутри ТГ обнаружены пегматоидные обособления – линзы и гнезда габбро-пегматитов (см. рис. 3е). В некоторых случаях есть признаки, что габбро-пегматиты непосредственно связаны с остыванием ТГ, в иных случаях имеются признаки связи габбро-пегматитов с более поздними внедрениями магмы. Их генезис является предметом отдельного исследования.

Третий тип (ТГ III) обнаружен в силлах группы Маха на западе Худолозовской мульды (Rakhimov et al., 2025). Это участки гибридных пород внутри мелкозернистых амфиболовых габбро-долери-

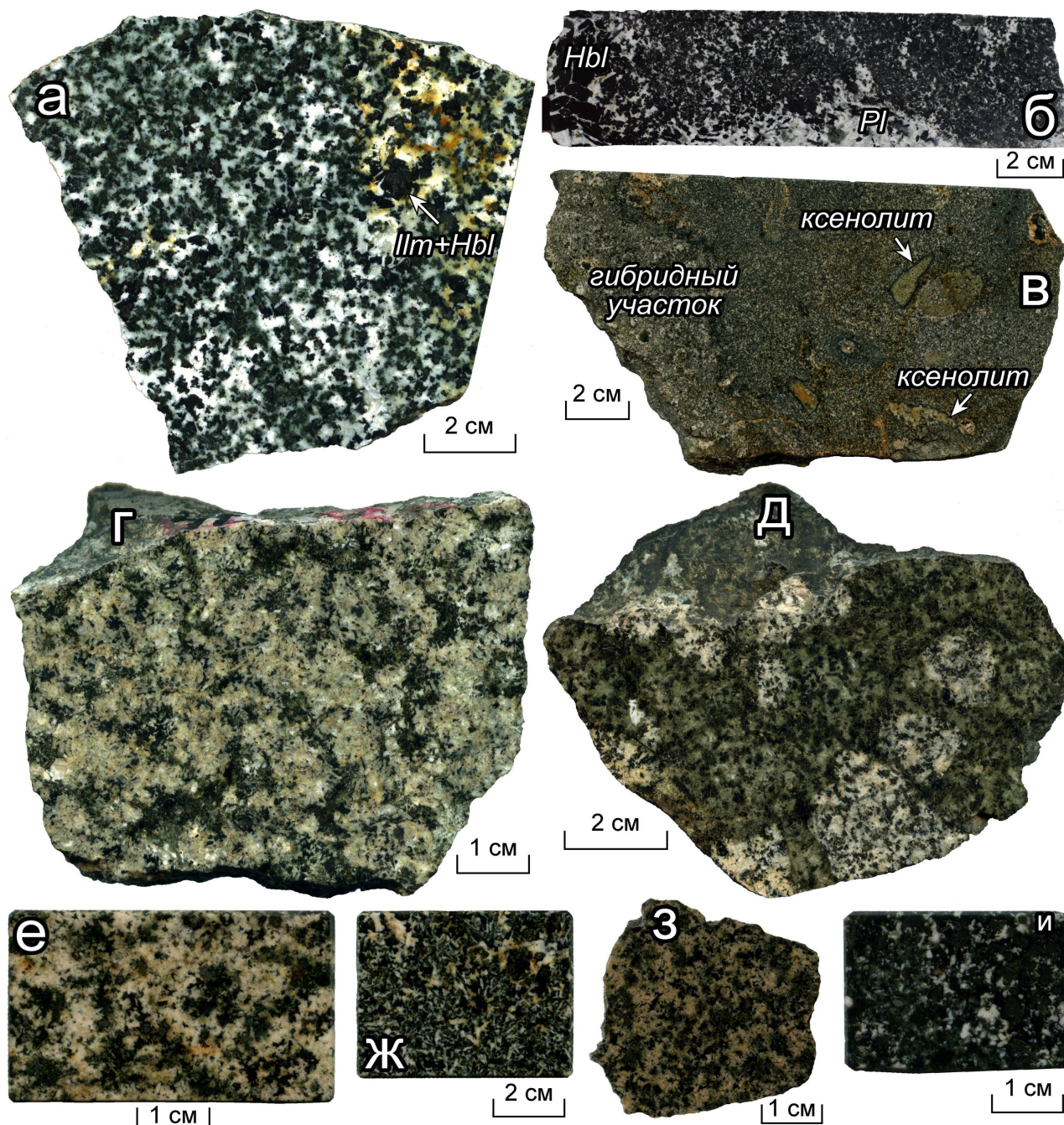


Рис. 4. Пришлифовки и аншлифы такситовых габбро худозавского комплекса.

а – пятнистое такситоподобное габбро массива Тузан (“рябчиковое”), б – пятнистое такситовое габбро с меланократовыми и лейкократовыми обособлениями массива Северный Бускун (керна), в – гибридное (контаминированное) габбро с ксенолитами песчаников и бластомилонитовых габбро силла группы Маха, г – шлировое габбро массива Уртазымской мулды, д – псевдоорбикулярное эпидотизированное шлировидное габбро массива Уртазымской мулды, е – шлировое габбро массива Туркменево, ж – пятнистый мелкозернистый габбро-долерит силла группы Маха, з – шлировое габбро массива Чебаркульской моноклинали, и – шлировое габбро массива Аласия.

Fig. 4. Polished sections of the Khudolaz complex taxitic gabbros.

а – patchy taxitic-like gabbro of the Tukan (“grouse-like”) massif, б – patchy taxitic gabbro with melanocratic and leucocratic segregations of the Severnyi Buskun massif (core), в – hybrid (contaminated) gabbro with xenoliths of sandstones and blastomylonite gabbro of the Makha group sill, г – schlieren gabbro of the Urtazym trough massif, д – pseudo-orbicular epidotized schlieren-like gabbro of the Urtazym trough massif, е – schlieren gabbro of the Turkmenevo massif, ж – patchy fine-grained gabbro-dolerite of the Makha group sill, з – schlieren gabbro of the Chebarkul monocline massif, и – schlieren gabbro of the Alasia massif.

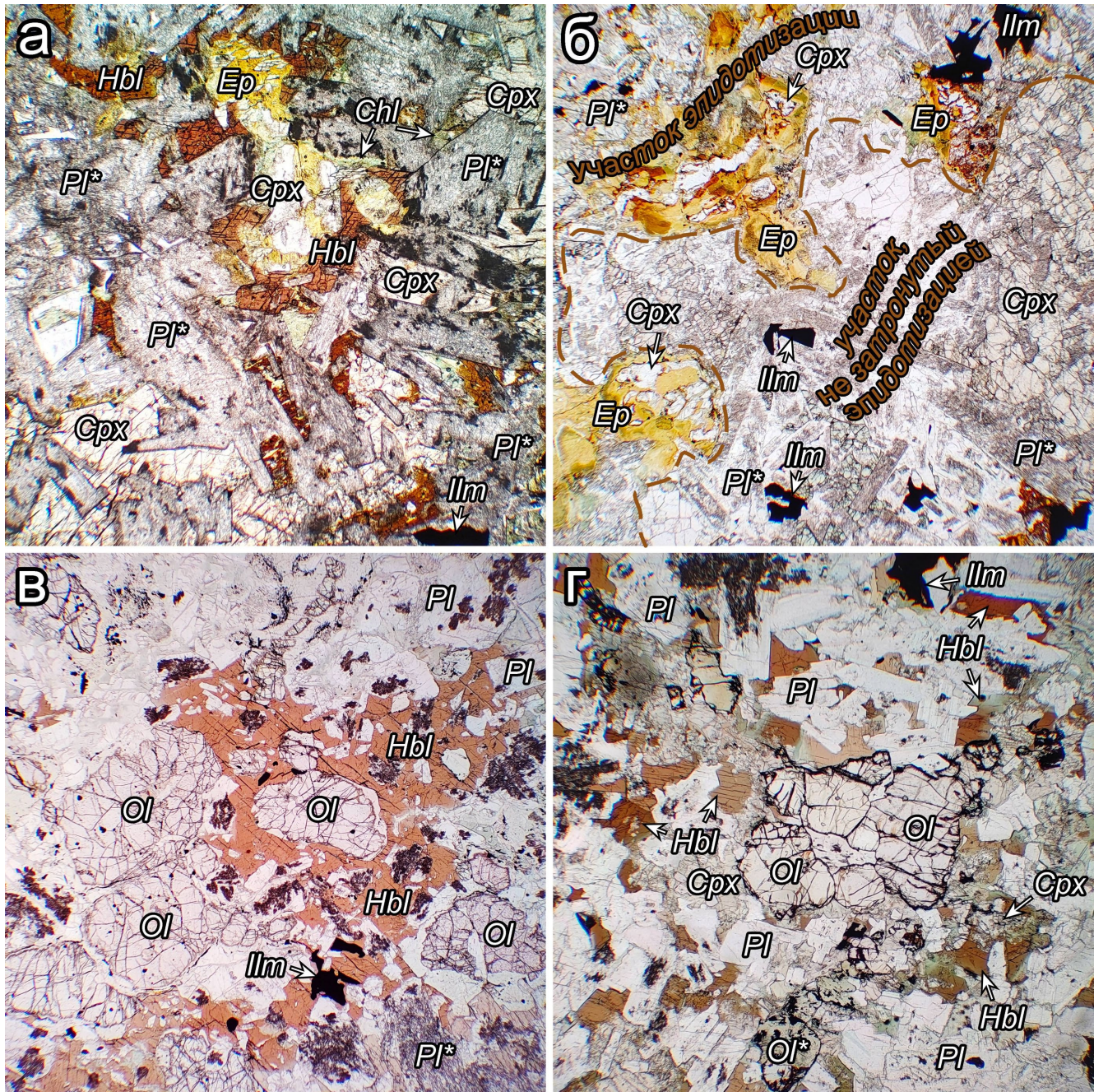


Рис. 5. Оптические микрофотографии такситовых габбро худолазовского комплекса (проходящий свет, сторона квадрата эквивалентна 5.5 мм).

а – метасоматизированное роговообманковое пятнистое габбро массива Талкас Бузавлыкской площади, б – псевдоорбическое метасоматизированное шлировидное габбро массива участка Ургаза Уртазымской мульды, в – шлировое оливин-роговообманковое габбро массива Аласия, г – шлировидное оливин-роговообманковое габбро массива Тук-Япрак. Минералы: *Cpx* – клинопироксен, *Ep* – эпидот, *Hbl* – роговая обманка, *Ilm* – ильменит, *Ol* – оливин, *Pl* – плагиоклаз. *Измененный минерал.

Fig. 5. Optical micrographs of the Khudolaz complex taxitic gabbros (transmitted light, the side of the square is equivalent to 5.5 mm).

а – metasomatized hornblende patchy gabbro of the Talkas massif from the Buzavlyk area, б – pseudo-orbicular metasomatized schlieren-like gabbro of the massif of the Urgaza site from the Urtazym trough, в – schlieren-olivine-hornblende gabbro of the Alasiya massif, г – schlieren-like olivine-hornblende gabbro of the Tuk-Yaparak massif. Minerals: *Cpx* – clinopyroxene, *Ep* – epidote, *Hbl* – hornblende, *Ilm* – ilmenite, *Ol* – olivine, *Pl* – plagioclase. *Altered mineral.

тов, в которых полностью или частично растворены ксенолиты вмещающих пород (кварцевых песчаников, бластомилонитовых габбро и др.) и возникли заливчатые очертания, пятна и полосы (см. рис. 4в).

Породообразующими минералами ТГ являются плагиоклаз, роговая обманка, реже – клинопироксен и оливин. Породы неравномерно метасоматизированы. В одних интрузиях встречаются свежие и слабоизмененные разности, в других – умеренно- и сильноизмененные. Наиболее часто встречается умеренноизмененное ТГ, состоящее из частично или полностью измененных плагиоклаза, роговой обманки, клинопироксена, ильменита с магнетитом и вторичных силикатов типа хлорита, актинолита и эпидота (см. рис. 5а).

Плагиоклаз является наиболее распространенным первичным силикатом (55–70 об. %), представленным таблитчатыми кристаллами размером от долей мм до 1–2 мм. Характерна прямая зональность с увеличением содержания натрия относительно кальция от центра к периферии кристалла. В большинстве изученных образцов плагиоклаз сосюртитизирован (см. рис. 5а, б). Первичные составы плагиоклаза (см. рис. 5в, г) получены в ряде проб и представлены на рис. 6а. Наиболее кальциевый состав (битовнит с $An_{85.5}$) выявлен в обр. K₂₃-108 (оливин-роговообманковое габбро, массив Восточный Бускун). В безоливиновых разностях обычен лабрадор с $An_{52.7-65.2}$. Установлено, что с увеличением альбитового минала в минерале слабо повышается содержание калия.

Амфибол представлен первичной коричневой роговой обманкой (см. рис. 5а, в, г) (магнезиогастингситом, ферропаргаситом и реже магнезиоферригорнблендитом согласно пересчету по методике (Hawthorne et al., 2012)), позднемагматической–постмагматической зеленой роговой обманкой (магнезио- и феррогорнблендитом) и вторичным зеленым актинолитом. Роговая обманка представлена ксеноморфными (пойкилитовыми, интерстициальными) или призматическими идиоморфными кристаллами. Первые типичны для оливиновых разностей, но нередки и в безоливиновых ТГ I. Вторые больше характерны для ТГ II и ТГ III. Размеры кристаллов варьируются от долей мм до нескольких мм. В сильноизмененных образцах коричневая роговая обманка замещена актинолитом и хлоритом. В изученных ТГ содержится от первых об. % до 20–25 об. % коричневой роговой обманки. Принципиальных различий по составу роговой обманки из разных типов ТГ не выявлено (рис. 7а, б). Однако следует отметить, что на классификационных диаграммах, применяемых для подгруппы кальциевых амфиболов, несколько обособляются точки составов из оливинового ТГ (обр. K₂₃-108 из массива Восточный Бускун), а также из безоливинового ТГ обр. D₁-40 (массив Туркменево). Кроме того, следует выделить ТГ из мас-

сива Северный Бускун (обр. D₄-5), где роговая обманка характеризуется наиболее широким диапазоном вариаций.

Оливин встречается в ТГ из композитного массива Восточный Бускун и в ряде мелких массивов, вероятно, однородного строения. Представлен округлыми кристаллами размером до 1–2 мм, а по составу (см. рис. 6б) отвечает хризолиту ($Fo_{76.4-78.3}$). Зональность не выявлена. Часто наблюдается в сростках-шлирах с клинопироксеном и роговой обманкой (см. рис. 5в). Количественно оливин четко дифференцирован между разными породными ассоциациями: либо отсутствует (или незначителен), либо развит в существенном количестве – от 10–15 до 20 об. %. Так, выявлена группа оливиновых пород с кумулятивной структурой (см. рис. 5в), характерной кумулюсной части интрузии. Оливин часто бывает замещен иддингситом, так что в образцах с низким содержанием оливина не удалось найти и проанализировать сохранившиеся зерна.

Клинопироксен встречается в ТГ нерегулярно (от единичных зерен до 15–20 об. %) в виде идиоморфных изометричных или призматических кристаллов, но нередко и в виде ксеноморфных интерстициальных выделений (особенно в оливиновых разностях), в том числе пойкилитовых (см. рис. 5а, г). Размеры кристаллов обычно не превышают 1 мм, иногда встречаются пойкилитовые кристаллы размером до 2–3 мм. Состав клинопироксена обычно соответствует диопсиду, иногда смещен в поле салита и эндиопсида (см. рис. 6в). Содержание энстатитового минала варьируется от 37.9 до 47.4 мол. %, вариации наблюдаются даже в пределах одного образца. В обр. B₂₃-74 из интрузии, локализованной в Уртазымской мульде (участок Ур-газа), клинопироксен отличается существенно более железистым составом, смещаясь к ферросалиту (Fs до 33 мол. %). Клинопироксен иногда частично замещен позднемагматической роговой обманкой, а также постмагматическими хлоритом, актинолитом и эпидотом (см. рис. 5а, б).

Рудные минералы. Наиболее распространен ильменит (до 3–5 об. %), реже встречается титаномагнетит (до 1–2 об. %). Ильменит часто ассоциирует с роговой обманкой, образуя с ней эвтектические сростания в интерстициях (см. рис. 5в), иногда в виде шлиров (см. рис. 4а). Зерна ксеноморфные, сложной морфологии (см. рис. 5а–г) при размерах до 1 мм, реже длиннопризматические. Титаномагнетит редко встречается в неизмененном виде и чаще представлен структурами распада, сложенными магнетитом и пластинами ильменита в пределах кристаллов тетраэдрического облика размером 0.2–0.3 мм или более. Часто лейкоксенизирован. В некоторых интрузиях (например, Ту-кан, Султан-Куль, Талкас, Агастау) ТГ относительно богаты сульфидами (до 1–3 об. %), как правило пиритом или пирротинном, образующими мелкие

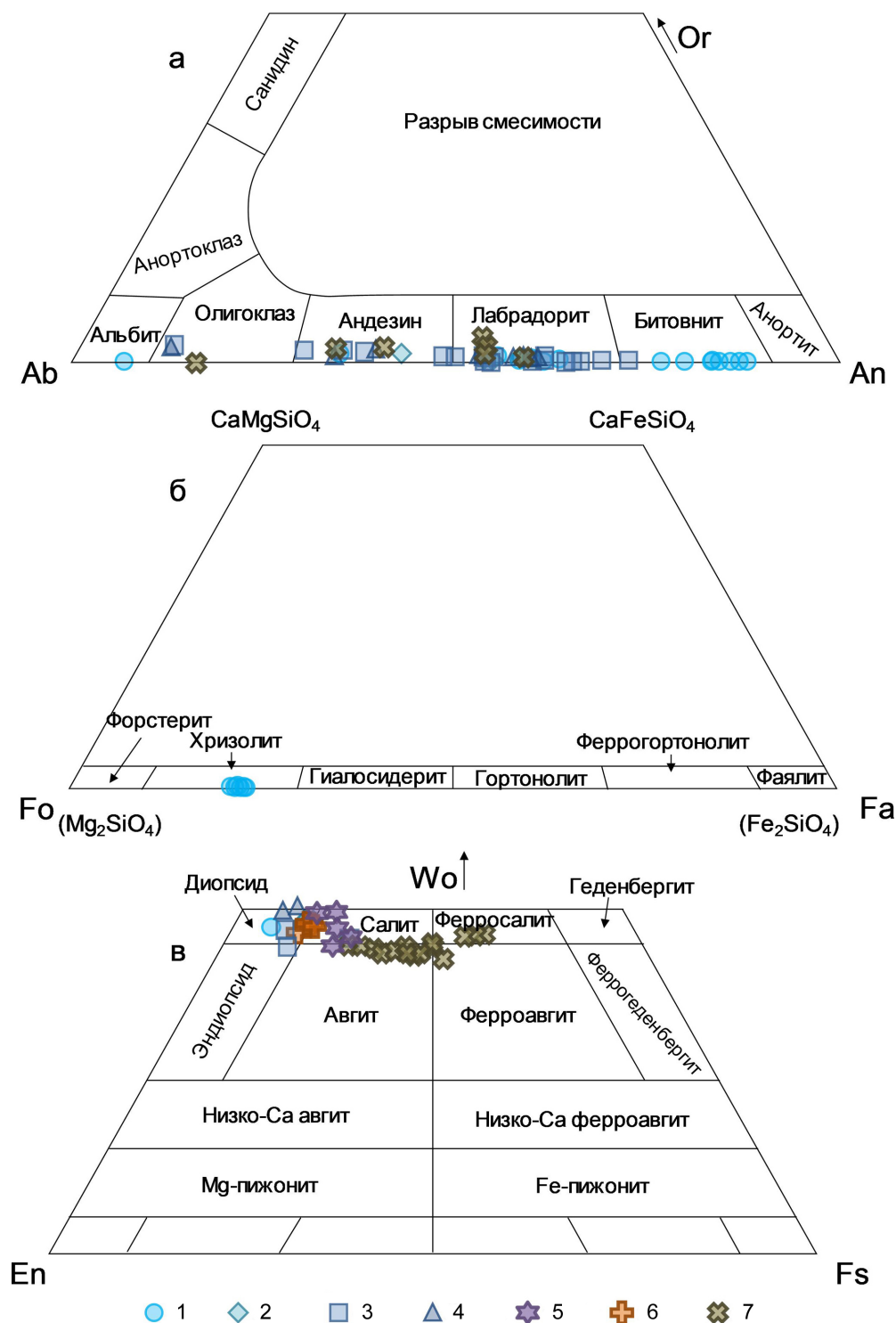


Рис. 6. Классификационные диаграммы для плагиоклаза (а), оливина (б) и клинопироксена (в) из такситовых габбро худолазовского комплекса, по (Deer et al., 1992, 1997).

1 – обр. K₂₃-108 (Восточный Бускун), 2 – обр. K₁₈-60 (Агастау), 3 – обр. D₁-86 (Султан-Куль), 4 – обр. D₁-3 (Тукан), 5 – обр. K₂₃-85 (Селивановский), 6 – обр. D₃-1 (Талкас), 7 – обр. B₂₃-74 (Ургаза).

Fig. 6. Classification diagrams for plagioclase (a), olivine (б) and clinopyroxene (в) from the Khudolaz complex taxitic gabbro according to (Deer et al., 1992, 1997).

1 – sample K₂₃-108 (Vostochnyi Buskun), 2 – sample K₁₈-60 (Agastau), 3 – sample D₁-86 (Sultan-Kul), 4 – sample D₁-3 (Tukan), 5 – sample K₂₃-85 (Selivanovskiy), 6 – sample D₃-1 (Talkas), 7 – sample B₂₃-74 (Urgaza).

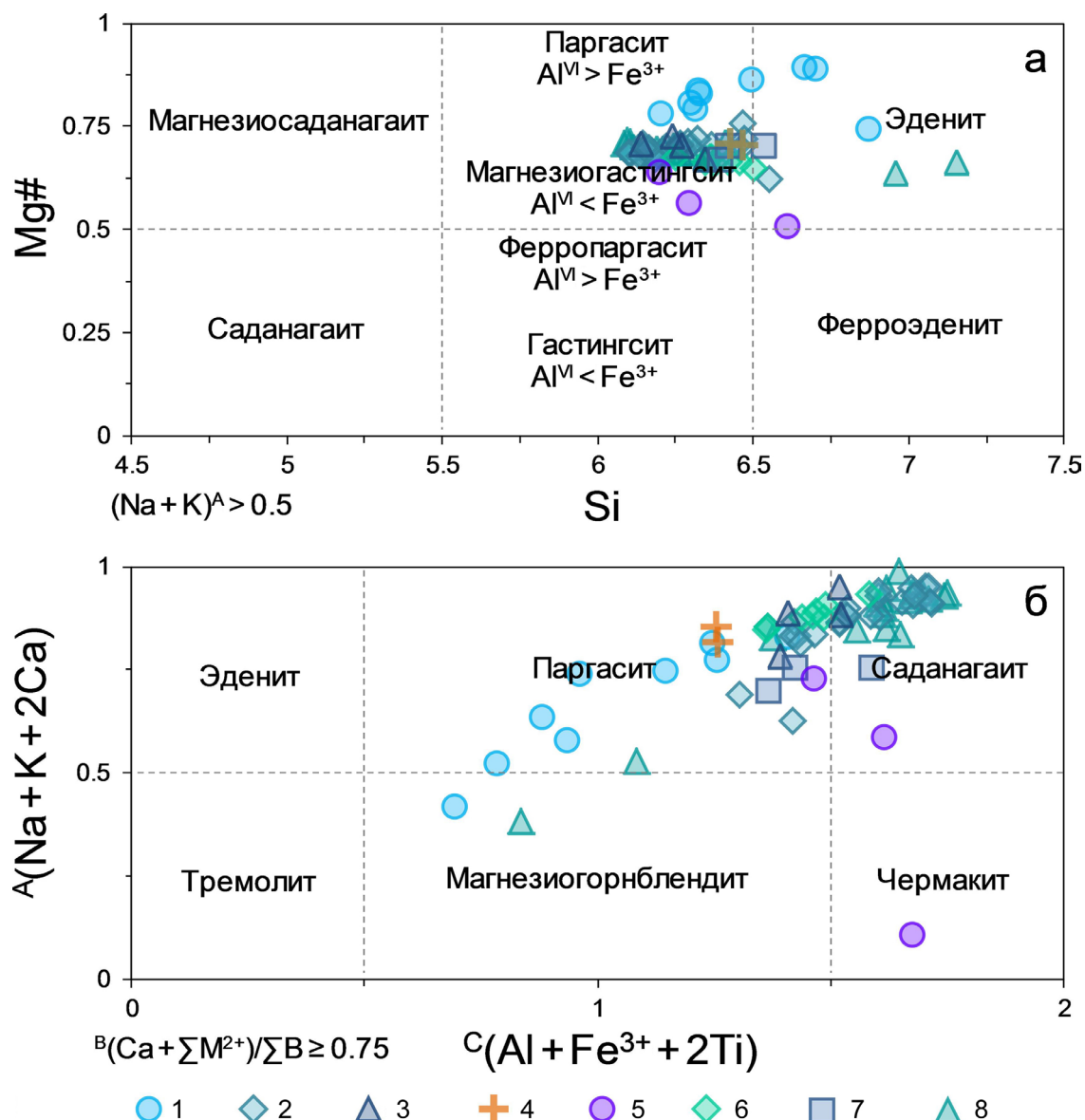


Рис. 7. Классификационные диаграммы для коричневой роговой обманки по (Leake et al., 1997) (а) и по (Hawthorne et al., 2012) (б) из такситовых габбро худолазовского комплекса.

1 – обр. K₂₃-108 (Восточный Бускун), 2 – обр. K₁₈-60 (Агастау), 3 – обр. D₁-3 (Тукан), 4 – D₃-1 (Талкас), 5 – D₁-40 (Туркменев), 6 – D₁-72 (группа Маха), 7 – D₁-86 (Султан-Куль), 8 – D₄-5 (Северный Бускун).

Fig. 7. Classification diagrams for brown hornblende according to (Leake et al., 1997) (a) and (Hawthorne et al., 2012) (b) from the Khudolaz complex taxitic gabbro.

1 – sample K₂₃-108 (Vostochnyi Buskun), 2 – sample K₁₈-60 (Agastau), 3 – sample D₁-3 (Tukan), 4 – D₃-1 (Talkas), 5 – D₁-40 (Turkmen), 6 – D₁-72 (Makha group), 7 – D₁-86 (Sultan-Kul), 8 – D₄-5 (Severnyi Buskun).

шлиры – сростки из нескольких кубических или ксеноморфных кристаллов. С ними в ассоциации в незначительном количестве встречаются халькопирит и кобальтин. Сульфиды нередко окислены с замещением гетитом или гематитом.

Второстепенные минералы включают биотит, калиевый полевой шпат, кварц и другие

фазы, суммарно не превышающие 1–2 об. % и встречающиеся в ограниченном количестве образцов.

Акцессорные минералы. Типичны фторапатит (игельчатые кристаллы в роговой обманке, плагиоклазе или в биотите) и циркон (редкие субмикронные выделения).

Геохимическая характеристика такситовых габбро

Химический состав ТГ ХДК вариативен (см. табл. ТГ_состав.xlsx по ссылке <https://disk.yandex.ru/d/woTdcFBFtyKGSA>) и охватывает диапазон от пикритового габбро до монцодиорита (рис. 8а) с доминированием группы нормальнощелочных габбро. Изменения содержаний MgO определяют эволюционные тренды для рассматриваемой выборки образцов, о чем можно судить по бинарным диаграммам (рис. 8б–з). Для всей совокупности проб ХДК, включая образцы из массивов, локализованных вне Худолазовской мульды, характерны однотипные тренды распределения фигуративных точек, но отчетливо различается подгруппа высокомагниевого пород. Оливиновые ТГ с $MgO > 15$ мас. % обособлены от безоливиновых и оливинсодержащих с $MgO < 12$ мас. %, а между ними наблюдается разрыв. Отсутствие в выборке переходных пород, вероятно, объясняется их ограниченным распространением в принципе, поскольку высокомагневые разности отвечают кумулусу, остальные – интеркумулусу. С уменьшением MgO в породах кумулуса слабо возрастают содержания SiO_2 , Na_2O , K_2O , почти не меняется магнезиальность $Mg\#$ ($MgO/(MgO + FeO)_{\text{мол. \%}}$), резко возрастают содержания Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO . В то же время в породах интеркумулуса при уменьшении MgO резко увеличиваются содержания SiO_2 , Na_2O , K_2O , стремительно падает $Mg\#$. Содержание CaO увеличивается до уровня умеренномагнезиальных, после чего падает. Такие вариации указывают на преобладающую роль оливина в формировании петрохимического облика пород кумулуса и плагиоклаза в петрохимии пород интеркумулуса. Образец контаминированного габбро (K_{23} -69d) отличается повышенным количеством кремнезема и незначительно – суммой щелочных оксидов при сопоставимых содержаниях остальных компонентов. Образцы из плагиоклазовых обособлений ТГ характеризуются высоким содержанием Al_2O_3 (21.7–23.4 мас. %) и пониженным количеством MgO (3.6–6.6 мас. %), но на вариационных диаграммах не выделяются (кроме рис. 8д). Содержание TiO_2 в породах умеренное и умеренноповышенное, оно слабо коррелирует с MgO , поскольку основное количество титана находится в форме собственных Ti -Fe минералов и в меньшее – в роговой обманке. Рассматриваемые породы имеют высокое количество потерь при прокаливании (п. п. п.) – >2.5 мас. % в среднем. Причем это почти не связано со степенью вторичной преобразованности породы. Однако для высокомагневых пород более явно выражена зависимость между п. п. п. и MgO (рис. 8ж), коррелирующая со степенью иддингситизации/серпентинизации оливиновых ТГ. Отметим, что из выборки исключены несколько проб с аномальны-

ми содержаниями элементов (например, имеющие $(Na_2O + K_2O) < 1$ мас. %), явно связанными с интенсивным постмагматическим преобразованием.

Микроэлементный состав ТГ вариативен. Наиболее обогащены несовместимыми микроэлементами безоливиновые ТГ, тогда как в кумулусных породах концентрации высокочargedных и крупноионных литофильных элементов существенно ниже. Исключением, однако, является поведение Cs, который характеризуется аномально высокими концентрациями в высокомагневых породах (>10 г/т). Как отмечалось в работе (Rakhimov et al., 2025), цезий мог абсорбироваться серпентинитом и смешаннослойными силикатами, замещившими оливин при гидротермальном метасоматозе. На спайдер-диаграммах (рис. 9) в целом наблюдается сходное распределение индикаторных микроэлементов в ТГ из разных массивов ХДК. Спектры редкоземельных элементов (РЗЭ) слабо фракционированы. Средняя величина $La/Yb_{(N)}$ не превышает 3.2, в ТГ из однородных хонолитов Худолазовской мульды и вовсе составляет 2.5. Между породами кумулуса и интеркумулуса выявлена небольшая разница в уровнях накопления РЗЭ, но $La/Yb_{(N)}$ не различается.

Изотопный состав Sr и Nd в такситовых габбро

Изотопный состав Sr и Nd (см. табл. ТГ_состав.xlsx по ссылке <https://disk.yandex.ru/d/woTdcFBFtyKGSA>) изучен в трех образцах ТГ: K_{22} -44d (пятнистое габбро массива Северный Бускун), D_3 -1 (пятнистое габбро массива Талкас), K_{23} -69d (контаминированное пятнистое габбро, силл группы Маха). Породы характеризуются величинами $^{87}Sr/^{86}Sr_{(330)}$ от 0.70319 до 0.70396 при $\epsilon Nd_{(330)} = +4.59 \dots +6.72$, что в целом характерно для производных мантийных источников (рис. 10а). В целом полученные изотопные Sm-Nd данные указывают на близость ТГ к изотопно-деплетированному мантийному источнику. Причины небольших отклонений от линии мантийной последовательности рассмотрены ниже (см. Обсуждение).

ОБСУЖДЕНИЕ

Условия кристаллизации и модельный расплав такситовых габбро

Ранее (Рахимов, Вишневский, 2023) на основе мономинеральных и биминеральных геотермометров (амфиболовых, плагиоклаз-амфиболовых) проведены оценки P - T условий позднемагматической стадии кристаллизации расплава пород ХДК. Для ТГ из массивов Северный Бускун (комполитный хонолит) и Агастау (однородный хонолит) получены следующие данные: $T = 876$ – $989^\circ C$, $P = 1.8$ – 3.9 кбар, $\log fO_2 = -10.7 \dots -13.9$, содержание H_2O в расплаве 3.2–5.9 мас. %. Отмечалось, что

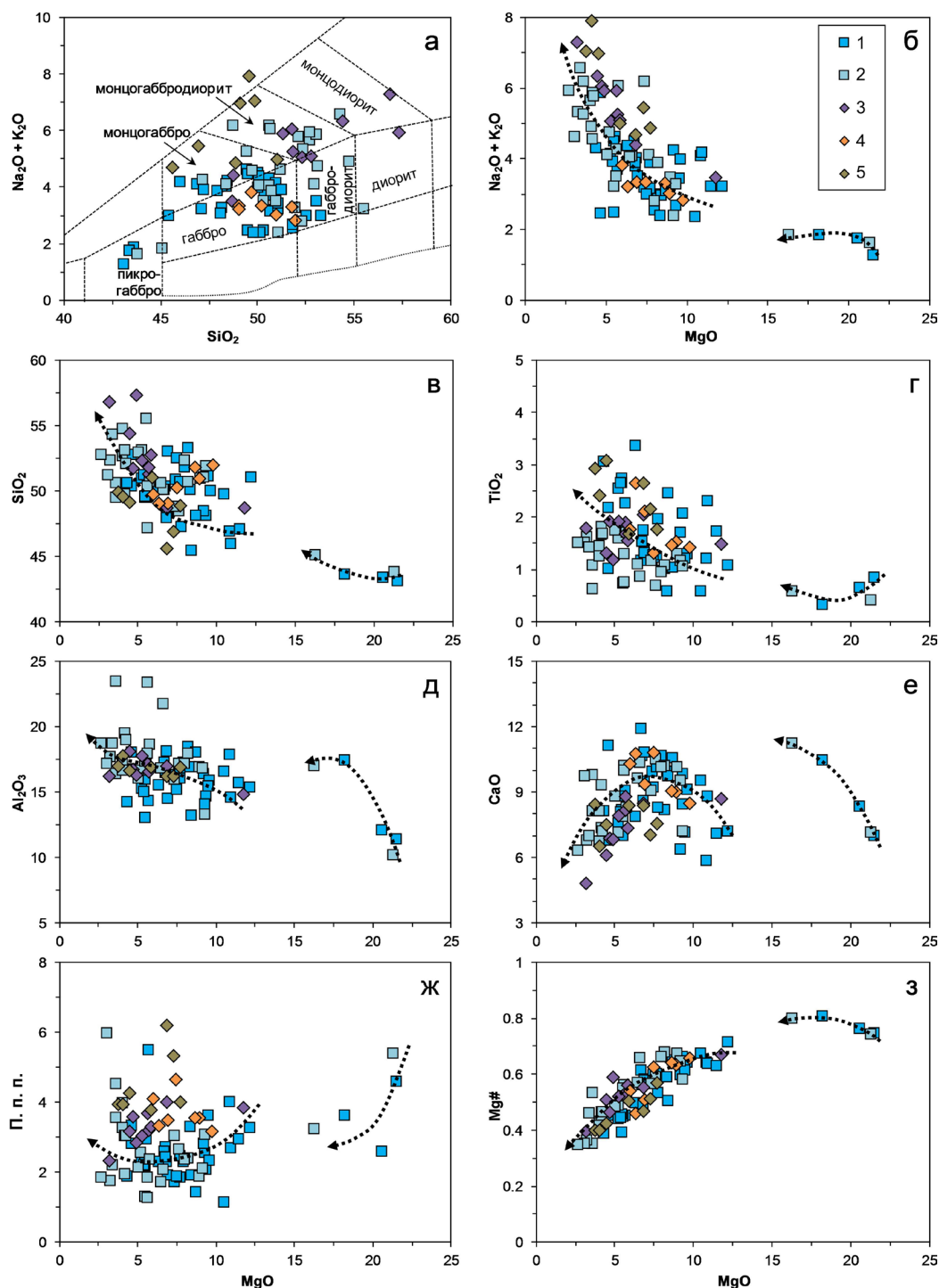


Рис. 8. Бинарные петрохимические диаграммы для такситовых габбро худолазовского комплекса в координатах TAS, по (Шарпёнок и др., 2013) (а) и “MgO–компонент” (мас. %).

1 – образцы из однородных интрузий Худолазовской мульды, 2 – образцы из композитных массивов Худолазовской мульды, 3 – образцы из интрузий Чебаркульской моноклинали, 4 – образцы из интрузий Бузавлыкской площади, 5 – образцы из интрузий Уртазымской мульды. П. п. п. – потери при прокаливании.

Fig. 8. Binary petrochemical diagrams for the Khudolaz complex taxitic gabbros in TAS coordinates according to (Sharpenok et al., 2013) (a) and the “MgO – component” (wt %).

1 – samples from uniform intrusions of the Khudolaz trough, 2 – samples from composite massifs of the Khudolaz trough, 3 – samples from intrusions of the Chebarkul monocline, 4 – samples from intrusions of the Buzavlyk area, 5 – samples from intrusions of the Urtazym trough. П. п. п. – loss of ignition.

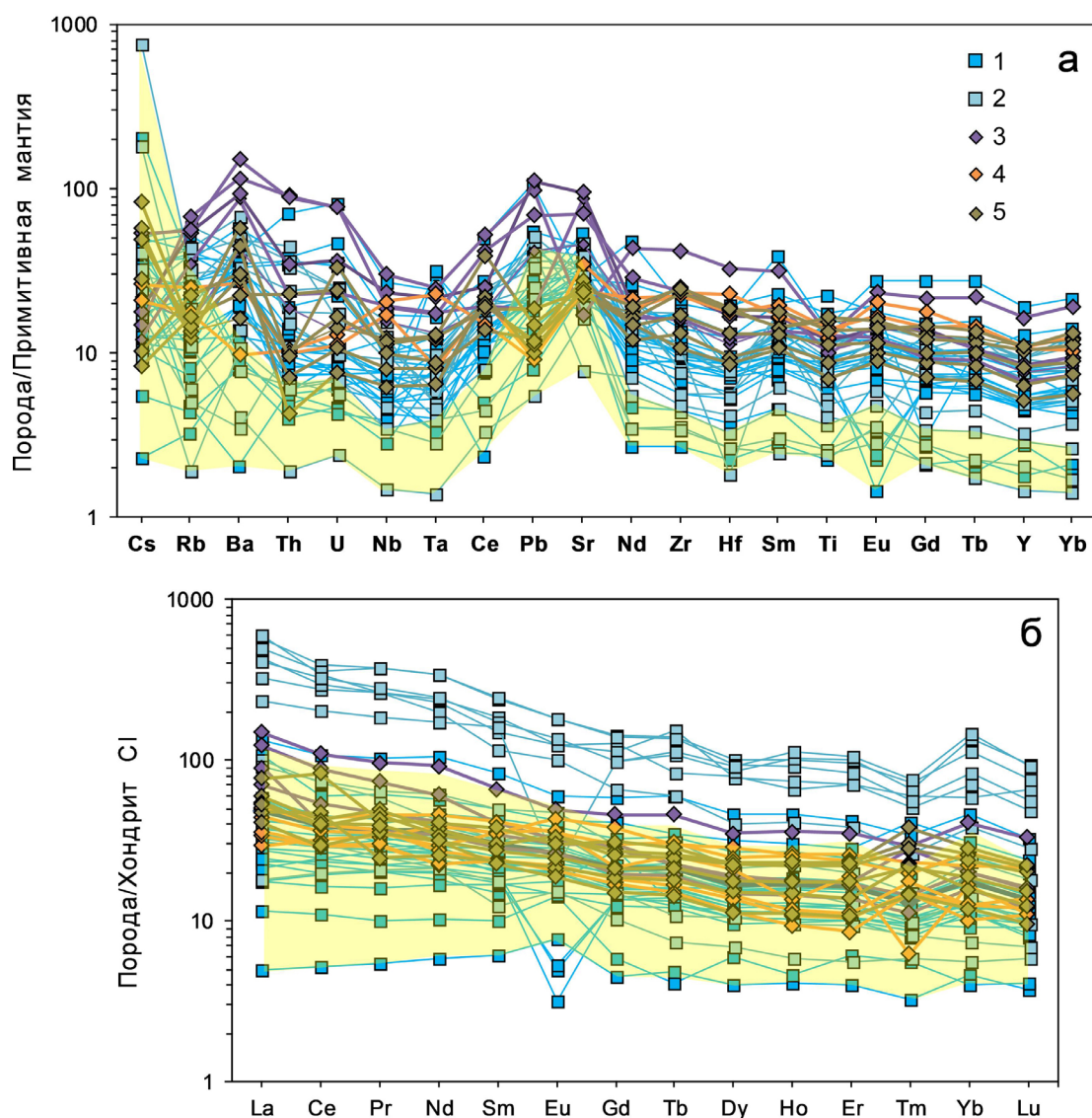


Рис. 9. Спайдер-диаграммы для такситовых габбро худолазовского комплекса.

Состав примитивной мантии и хондрита – по (Lyubetskaya, Korenaga, 2007). Желтым полем отмечены кумулюсные породы. Условные обозначения – см. рис. 8.

Fig. 9. Spider diagrams for the Khudolaz complex taxitic gabbros.

Primitive mantle and chondrite composition – according to (Lyubetskaya, Korenaga, 2007). Cumulus rocks are marked in yellow. Legend – see Fig. 8.

расчетные параметры, полученные согласно Si-Al-Mg-термобарометру по (Ridolfi et al., 2010), наиболее корректны. Используя данный термобарометр в рамках текущего исследования дополнительно оценены условия кристаллизации коричневой роговой обманки в образцах D₃-1, D₁-3, D₁-86, D₁-72, K₂₃-108 и D₁-40 (соответствующих интрузиям Талкас, Тукал, Султан-Куль, силлу группы Маха и композитным массивам Восточный Бускун и Туркменево), получены следующие результаты: $T = 881\text{--}996^\circ\text{C}$, $P = 1.7\text{--}5.7$ кбар, $\log f_{\text{O}_2} = -9.3 \dots -12.3$, содержании H₂O 3.7–6.7 мас. %.

Для оценки температуры ликвидуса применена программа Comagmat 3.75 (<https://comagmat.web.ru/apps-comagmat.html>) в режиме расслоенной интрузии при давлении 3–4 кбар, содержании воды 0.5 мас. %, фугитивности кислорода в рамках буфера QFM, соотношении нижнего расслоенного горизонта к верхнему 0.1 и пористости первого 20–25%, второго – 70–80%. В качестве состава исходного расплава использован образец габбродолерита из силлу группы Маха (обр. D1-070) (табл. 1), кристаллизационная кривая которого наи-

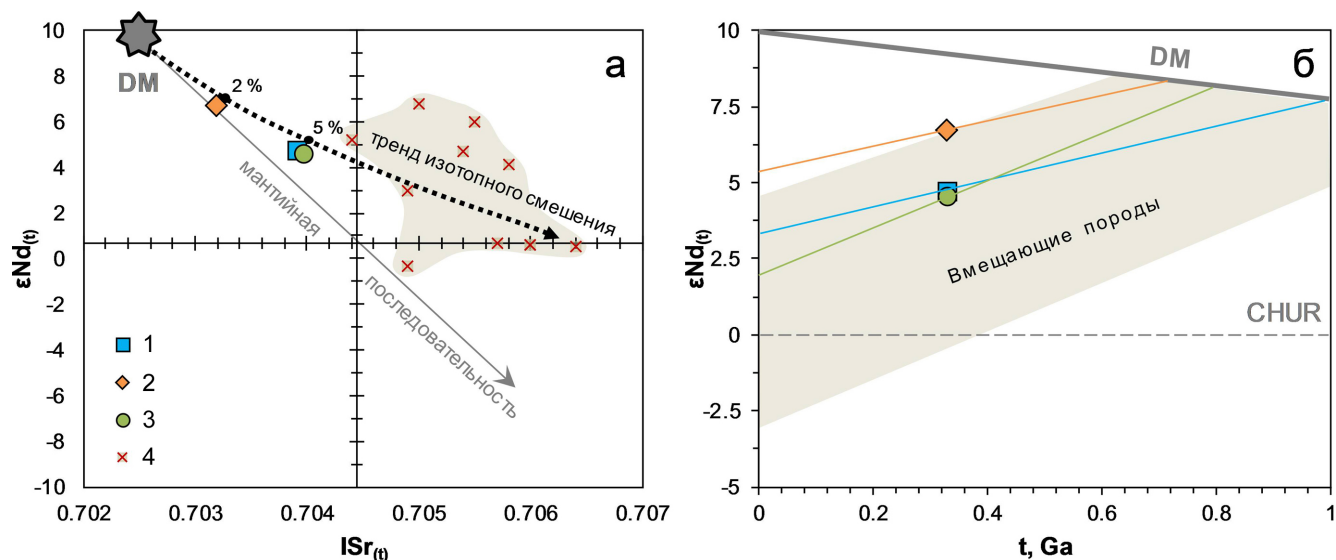


Рис. 10. Sr-Nd изотопные диаграммы для такситовых габбро худолазовского комплекса.

Пересчитано на 330 млн лет с использованием данных (Goldstein, Jacobsen, 1988). DM – деплетированная мантия. Поле вмещающих пород взято из (Rakhimov et al., 2025). 1 – Северный Бускун, 2 – Талкас, 3 – группа Маха, 4 – вмещающие.

Fig. 10. Sr-Nd isotope diagrams for the Khudolaz complex taxitic gabbro.

Recalculated to 330 Ma using data (Goldstein and Jacobsen, 1988). DM – depleted mantle. The field of host rocks taken from (Rakhimov et al., 2025). 1 – Severnyi Buskun, 2 – Talkas, 3 – Makh group, 4 – containing.

Таблица 1. Химический состав модельного расплава для такситовых габбро худолазовского комплекса

Table 1. Chemical composition of the model melt for the Khudolaz complex taxitic gabbro

Образец	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO _t	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	LOI
D ₁ -070	47.941	1.265	15.468	11.907	0.207	7.550	8.095	1.948	1.086	0.143	0.020	2.420

более точно воспроизводит тренды распределения реальных образцов ТГ (рис. 11). Сходное распределение имеют ТГ из интрузий вне Худолазовской мульды, что свидетельствует о близком составе и их исходного расплава. Согласно расчетным данным, степень кристаллизации достигает 75%, первым на ликвидусе появляется оливин ($Fo_{80.2}$) при $T = 1204^{\circ}C$. Реальный оливин из кумулусной породы (обр. K₂₃-108) имеет $Fo_{78.3}$. Это различие может быть обусловлено либо недостаточной выборкой реальных составов оливина, либо переувлажнением оливина при реакции с интеркумулусом. Следующим минералом является плагиоклаз с $An_{78.1}$, хотя в том же обр. K₂₃-108 обнаружен плагиоклаз до $An_{85.5}$, что может быть обусловлено большим содержанием воды в расплаве, чем предполагалось на исходном уровне – 0.5 мас. %, поскольку добавление воды смещает состав плагиоклаза в сторону более кальциевого (Feig et al., 2006). После этого появляется клинопироксен с $En_{47.6}$, что почти совпадает с реальным клинопироксеном из обр. K₂₃-108, имеющим $En_{47.4}$. К сожа-

лению, программа Comagmat, как и многие другие петрологические приложения, не воспроизводит амфибол, довольно широко присутствующий в реальных породах ХДК. Поэтому результаты моделирования не являются точно воспроизводящими природную систему, однако вполне применимы до уровня кристаллизации модельного расплава до 75%.

Контаминация базитового расплава, в частности, кварцевыми песчаниками должна была обеспечить добавление SiO₂, что влечет за собой сдвиг точки эвтектики в сторону ортопироксенсодержащей ассоциации (Presnall et al., 1978), т. е. возникновение более подходящих условий для кристаллизации ортопироксена, а не оливина. Однако в наблюдаемых образцах ортопироксен не обнаружен, что свидетельствует о недостаточности степени контаминации для фазового сдвига либо разбавлении вещества ксенолита уже после кристаллизации оливина. То есть контаминация могла произойти не с первичным расплавом, а с интеркумулусным.

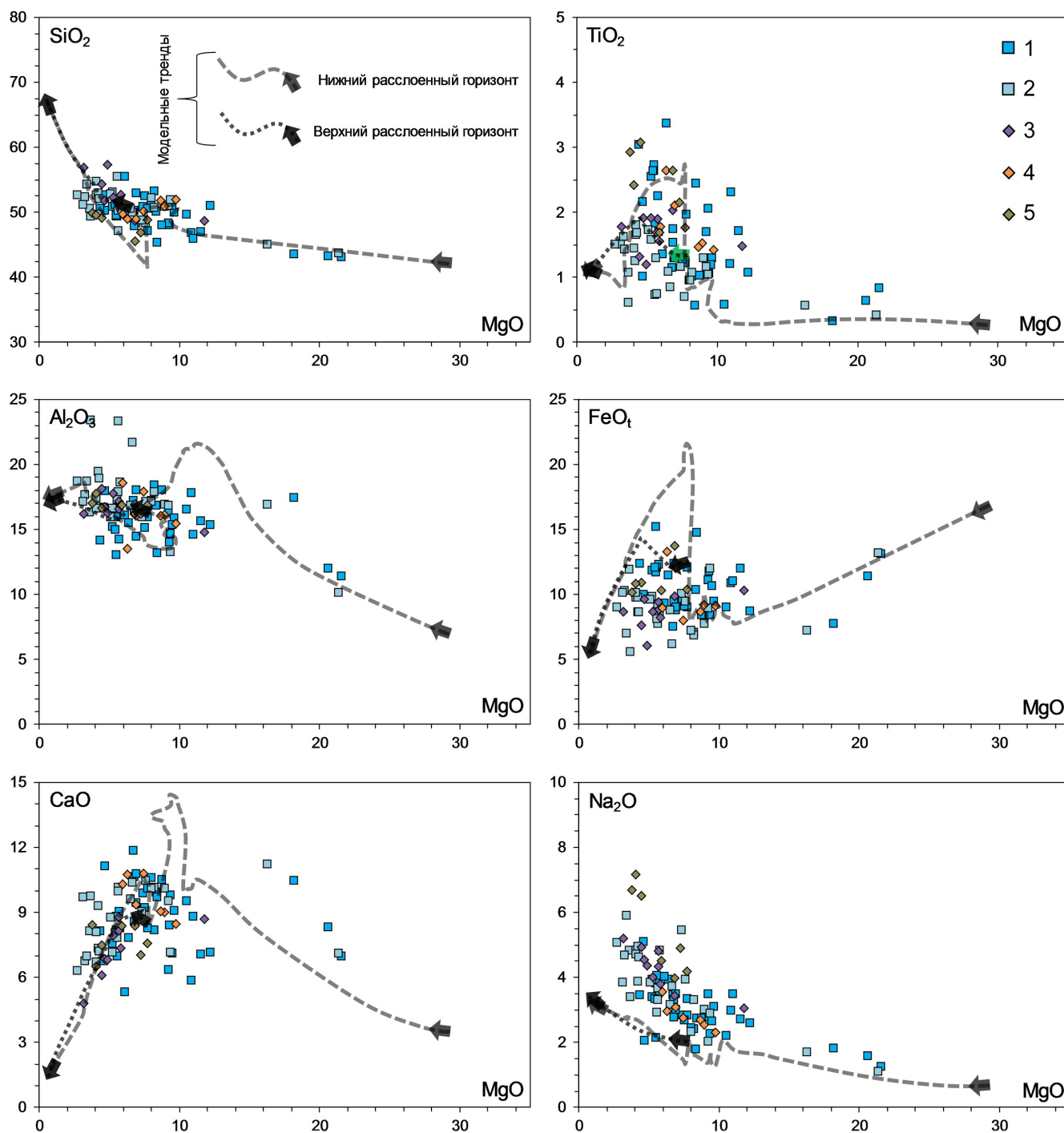


Рис. 11. Модельные тренды кристаллизации исходного расплава (программа Comagmat 3.75, режим расслоенного интрузива) и распределение реальных образцов такситовых габбро худолазовского комплекса на бинарных петрохимических диаграммах “MgO–компонент” (в мас. %).

Условные обозначения – см. рис. 8.

Fig. 11. Model crystallization trends of the initial melt (Comagmat 3.75 program, layered intrusion mode) and the distribution of real taxitic gabbro samples from the Khudolaz complex on binary petrochemical diagrams of “MgO–component” (in wt %).

Legend – see Fig. 8.

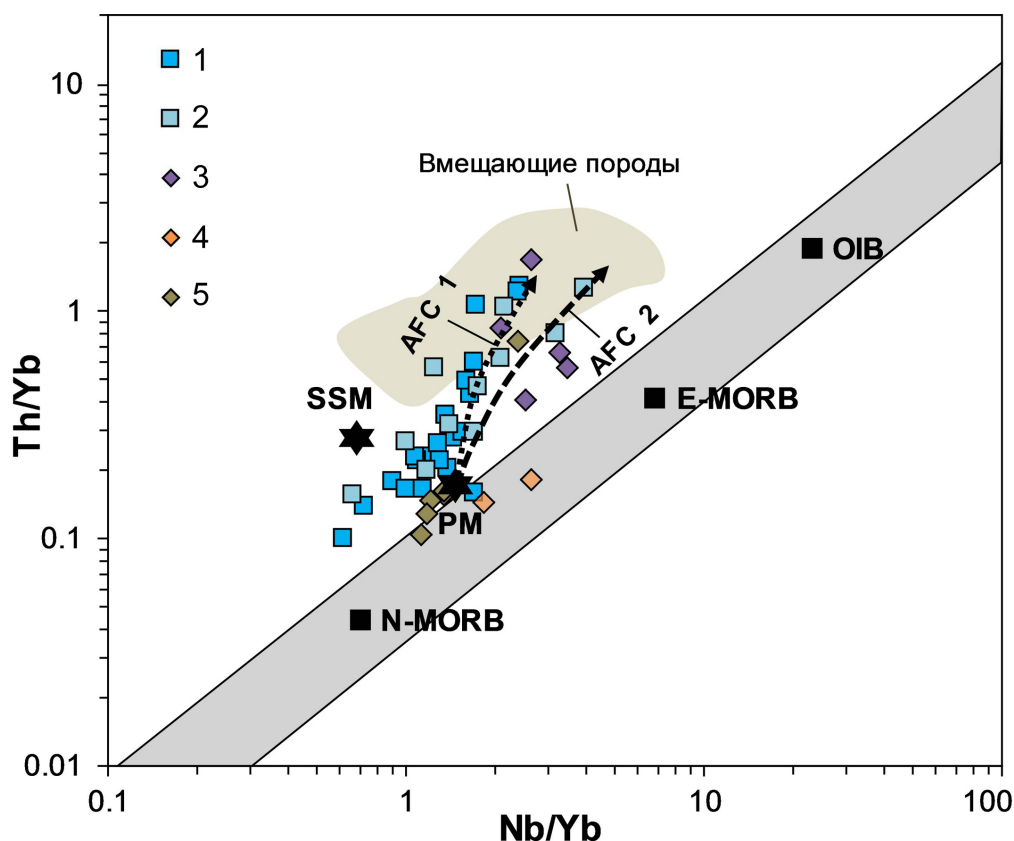


Рис. 12. Диаграмма Nb/Yb–Th/Yb, по (Pearce, 2008), для такситовых габбро худолазовского комплекса.

Условные обозначения – см. рис. 8. Тренды ассимиляции и фракционной кристаллизации между примитивной мантией (PM) и потенциальными контаминантами рассчитаны в программе FC-AFC-FCA and mixing modeler (Ersoy, Helvacı, 2010): тренд AFC 1 с конечной точкой для среднего состава вмещающих пород островодужного террейна – по (Rakhimov et al., 2025), тренд AFC 2 с конечной точкой для валовой континентальной коры – по (Taylor, McLennan, 1995). Средние составы PM, нормальных (N-MORB) и обогащенных (E-MORB) базальтов срединно-океанических хребтов и базальтов океанических островов (OIB) даны по (Sun, McDonough, 1989), средний состав мантии надсубдукционного клина – по (Наумов и др., 2010).

Fig. 12. Nb/Yb–Th/Yb diagram after (Pearce, 2008) for the Khudolaz complex taxitic gabbros.

Legend – see Fig. 8. The assimilation and fractional crystallization trends between the primitive mantle (PM) and potential contaminants were calculated using the FC-AFC-FCA and mixing modeler program (Ersoy, Helvacı, 2010): AFC 1 trend with the end point for the average composition of the host rocks of the island-arc terrane after (Rakhimov et al., 2025), AFC 2 trend with the end point for the bulk continental crust after (Taylor, McLennan, 1995). The average compositions of the PM, normal (N-MORB), and enriched (E-MORB) mid-ocean ridge basalts and ocean island basalts (OIB) are given according to (Sun and McDonough, 1989); the average composition of the suprasubduction wedge mantle is given according to (Naumov et al., 2010).

Источники магмогенерации для такситовых габбро

Для интерпретации мантийного источника ТГ использовалась дискриминационная геохимическая диаграмма Nb/Yb–Th/Yb, к которой удобно применять и модельные тренды фракционирования и контаминации (рис. 12). Изученные габброиды частично перекрываются с полем составов вулканогенно-осадочных пород МОДТ (основные и средние вулканиты, песчаники, тефроиды, туфы из ирендыкской, улутауской, мукасовской, биягодинской и зилаирской свит среднего–позднего де-

вона), вмещающих интрузии ХДК. Большинство фигуративных точек ТГ образуют тренд, направленный из области близ среднего состава примитивной мантии в область вмещающих пород. Для оценки степени контаминации примитивного расплава ТГ, который мог иметь геохимические характеристики примитивной мантии, вмещающими породами применена программа FC-AFC-FCA and mixing modeler (Ersoy, Helvacı, 2010). На рис. 12 показаны два тренда ассимиляции и фракционной кристаллизации: AFC 1 и AFC 2. Первый, наиболее сходный с распределением большинства точек ТГ (в особенности из массивов Худолазовской

мульды), характеризует взаимодействие базитового расплава с породами МОДТ, а второй тренд, с которым комплементарна часть точек ТГ (в большей степени из массивов Чебаркульской моноклинали), указывает на взаимодействие с универсальным источником – валовой континентальной корой. В первом случае, согласно расчетам в указанной программе, степень контаминации оценивается до 7%, а во втором – до 9%. Наиболее близкими к примитивной мантии геохимическими характеристиками обладают ТГ из Уртазымской мульды (см. рис. 12), что указывает на их наиболее примитивный состав. В целом рассмотренные ТГ происходят из мантийного источника, который по своим характеристикам является промежуточным между примитивной мантией и мантией надсубдукционного клина, как уже отмечалось в работе (Rakhimov et al., 2025).

Изотопно-геохимические характеристики Sr и Nd также указывают на потенциальное участие в магмогенерации вмещающих пород МОДТ. На диаграмме изотопного состава Nd (см. рис. 10б) ТГ перекрываются с полем вмещающих пород. Согласно модели двухкомпонентного смешения (Faurge, 1986) изученная выборка ТГ по трем образцам могла происходить из расплава, на 2–5% контаминированного вулканогенно-осадочными породами МОДТ (см. рис. 10а). Эти значения достаточно близки к полученным по расчетам для данных по валовой геохимии (до 7%), что свидетельствует о высокой вероятности такого сценария происхождения исходного расплава.

Механизмы образования такситовых габбро

Наиболее детально и всесторонне проблемы происхождения ТГ (или такситовых габбро-долеритов, как их чаще называют норильские петрологи) рассмотрены на примере интрузий Норильского района (Роговер, 1959; Золотухин, 1963, 1964, 1997; Рябов, 1969; Коровяков и др., 2025). По мнению (Роговер, 1959), происхождение ТГ связано с ассимиляцией базальтовой магмой вмещающих песчаников, в связи с чем эвтектика смещается в сторону плагиоклаза. В.В. Золотухин (1963, 1997) считал, что ТГ возникают в результате вторичного переплавления приконтактовых пород, а сульфидная минерализация связана с осаждением вещества из собственных флюидов. В.В. Рябов (1969) связал происхождение ТГ с плавлением более ранних габбро-долеритов более поздними расплавами близкого состава, а “такситовость” – с неравномерной переработкой свежей магмой обломков апоинтрузивных роговиков. В.А. Радько разработал модель, согласно которой ТГ формируются при внутрикамерной кристаллизационной дифференциации за счет всплытия в расплаве кристаллов плагиоклаза и лейкократовых автолитов (Радько, 1991).

Н.А. Криволуцкая с соавторами (2001) с использованием Комагмат-моделирования обосновали формирование и такситовых, и пикритовых габбро из единой толеитовой магмы. Петрохимические вариации пород связывались ими с варьирующимися соотношениями вкрапленников оливина и плагиоклаза с расплавом, резкие петрографические переходы объяснялись динамикой отсадки интрателлурических фаз. Недавно при исследованиях ТГ в интрузии Норильск I И.Ф. Чайка (2023) вслед за А.П. Лихачевым (1965) пришел к выводу об их ранней природе, т. е. до внедрения главной дифференцированной зоны. Таким образом, если обобщить и упростить подходы к объяснению происхождения ТГ, можно выделить две концепции: 1) модель многофазного внедрения расплава из глубинного очага (с предварительной дифференциацией или без нее), 2) модель ассимиляции и дифференциации на месте становления интрузии.

В ХДК основным фактором возникновения такситовой текстуры, по мнению автора, является водонасыщенность расплава, а дополнительным – контаминация вмещающими породами. Участие ксенолитов в магмогенерации вряд ли было решающим фактором возникновения “такситовости”, поскольку такситовыми являются и те образцы, которые по геохимическим характеристикам (включая изотопный состав Sr и Nd) наиболее близки к примитивной мантии. В условиях малого размера интрузивных камер процессы конвекции и гомогенизации вещества при многократных внедрениях расплава были ограничены. Многочисленность интрузий и их малый размер обусловлены проблемой пространства в условиях синдвиговой тектоники. Для ХДК разработана модель развития в обстановке общего сжатия с локальными синдвиговыми растяжениями (Rakhimov et al., 2025). Следует отметить, что обнаруженные в габбро-долеритах ксенолиты не могут иметь отношения к породам МОДТ, поскольку кварцевые песчаники и blastsмилонитовые габбро развиты только в более древних комплексах, обнаженных к западу от Западно-Магнитогорской зоны. Это, наряду с обилием ксеногенных цирконов в породах ХДК, дало повод рассмотреть участие метаосадочных пород окраины палеоконтинента Лавруссия и офиолитовой ассоциации зоны Главного Уральского разлома в формировании ХДК (Rakhimov et al., 2025). Обломки габброидов собственного худолозовского типа пока не выявлены, но обнаружены следы переработки обломков тefроидов островодужного террейна.

На рис. 13 представлена схема возникновения “такситовости” в интрузиях ХДК. Текстуры полосчатости, завихрения салических и мафических обособлений и мафические шлиры указывают на активный гидродинамический режим внутри некоторых интрузивных камер. Вероятно, такой режим

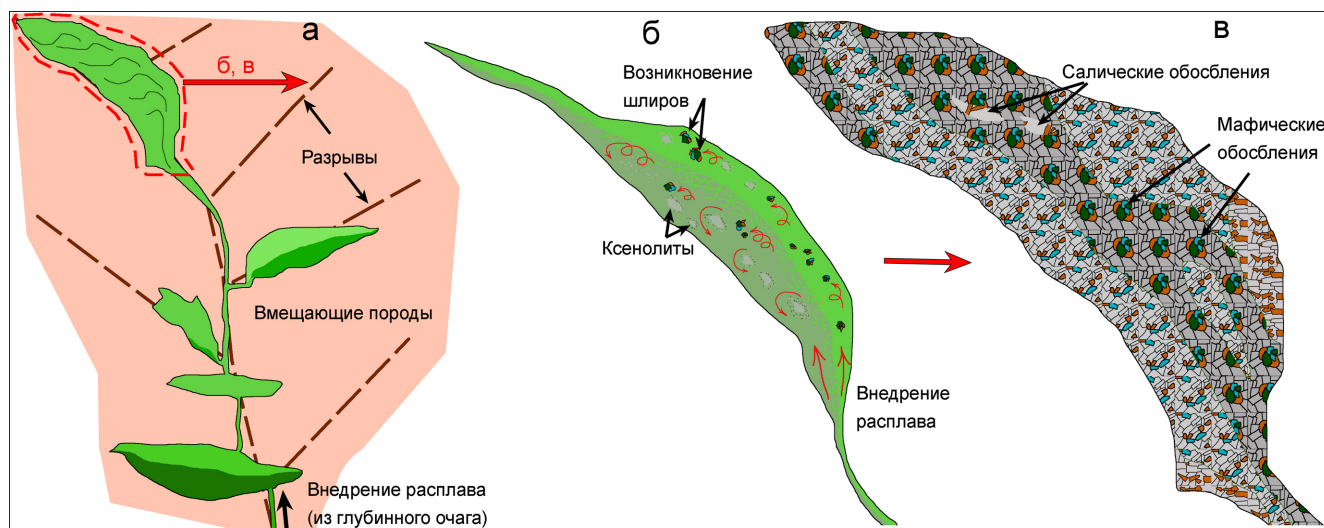


Рис. 13. Принципиальная схема образования интрузии такситовых габбро худолазовского комплекса. Построена с использованием данных (Rakhimov et al., 2025).

а – распространение магмы вдоль разрывов во вмещающих породах, б – ранняя стадия многократного внедрения расплава с ксенолитами и фенокристами, в – кристаллизация камеры неравномерных такситовых габбро.

Fig. 13. Schematic model of the Khudolaz complex taxitic gabbro intrusion formation. Constructed using data from (Rakhimov et al., 2025).

а – magma propagation along faults in the host rocks, б – early stage of multiple injection of melt captured xenoliths and phenocrysts, в – crystallization of the chamber of irregular taxitic gabbro.

обусловлен высоким флюидным давлением, малой вязкостью расплава с локальными участками повышенной вязкости (особенно в участках растворения ксенолитов) и сложной морфологией интрузивных камер, формирующихся в пределах вторичных разломов (сколов) и в участках их пересечений. Отдельные обособления внутри интрузий характеризуются более высокими или низкими количествами как полевого шпата, так и мафических минералов – клинопироксена и роговой обманки. Это, наряду с геохимическими вариациями внутри тел, указывает на неоднократное поступление порций расплава. В отличие от модели формирования “такситовости” в интрузии Кортадерас (Центральное Чили) с привлечением многочисленных порций расплава из разных источников (Higgins, Morata, 2019) для ХДК предполагается внедрение из единого источника, но, возможно, из разных промежуточных камер с разной степень дифференциации. Водонасыщенность расплава, судя по всему, была первичной, и переработка ксенолитов могла лишь дополнительно обогатить его флюидом. Как показано выше, источником магм ХДК являлась мантия с промежуточными геохимическими характеристиками между примитивной мантией и надсубдукционным клином, т. е. ранее метасоматизированная, что может быть обусловлено наследием предыдущего надсубдукционного режима (Пучков, 2010).

Металлогеническая специализация такситовых габбро

Многочисленные наблюдения, в частности, образцов из обнажений и керна свидетельствуют об отсутствии экономически значимых концентраций Cu и Ni в ТГ ХДК. В большинстве случаев изученные ТГ бедны сульфидами ($S < 0.1$ мас. %). Некоторые интрузии (например, Тукан, Агастау, Султан-Куль) включают сульфидизированные ТГ с количеством сульфидов до 1–3 об. %. Но они представлены в основном пиритом и пирротинном, тогда как халькопирит и пентландит имеют следовые количества или вовсе не обнаруживаются. По этому критерию ТГ контрастируют со шприсгеймитами и однородными меланократовыми габбро, в которых встречаются залежи вкрапленных (и редко массивных) сульфидных руд с содержаниями Cu и Ni до 1–2 мас. % (и элементы платиновой группы суммарно до 1 г/т). Сульфиды ХДК, включая сульфиды из ТГ, характеризуются узким диапазоном вариаций изотопного состава серы ($\delta^{34}S = -1.4 \dots +1.7$), отвечающим мантийным характеристикам (Рахимов и др., 2021). Это свидетельствует об отсутствии явных признаков добавления коровых источников серы.

В отличие от ХДК ТГ в интрузиях Норильского типа часто рудоносны. Согласно модели (Чайка, 2023), сульфиды в ТГ из дифференцированных ин-

трузий Норильского района скапливались в зонах интенсивного выделения флюидов, в основном за счет переработки ксенолитов. В то же время в ХДК сульфиды аккумулярованы лишь в кумулатах или габброидах, производных от относительно сухих магм. Кроме того, в отличие от норильских габброидов в типично контаминированных породах ХДК сульфиды (а также хромит) почти отсутствуют. Габброиды Норильского района также характеризуются аномальным изотопным составом Sr (Sereda et al., 2020) и широко варьирующимся изотопным составом S, что указывает на высокую степень контаминации первичных расплавов разнообразным веществом. В случае с ХДК, по всей видимости, контаминация была не столь глубокой и не столь разнообразной по вещественным характеристикам. То есть в магмогенерации участвовали только такие вмещающие породы, которые лишь разбавляли концентрации металлов и не способствовали процессам концентрирования.

ТГ ХДК относительно богаты TiO_2 (до 3.4 мас. %) и Ti-Fe оксидными фазами (ильменитом и реже титаномagnetитом). Однако ни по результатам изучения естественных и искусственных разрезов, ни по результатам бурения какие-либо рудные скопления Ti-Fe оксидов в породах ХДК пока не обнаружены. Выделение ильменита в ТГ произошло в основном в позднемагматическую фазу, совместно с коричневой роговой обманкой, когда содержание воды в расплаве стало высоким (до 5–6 мас. %). Ильменит часто представлен ксеноморфными выделениями, в том числе в сростании с роговой обманкой. Наиболее высокотитанисты являются умеренно- и низкомagneзиальные ТГ ($\text{Mg\#}$ 0.39–0.50) с достаточно низким содержанием кремнезема и низким п. п. п. То есть это умеренно эволюционированные породы (ранние дифференциаты) с низкой степенью контаминации. Сочетание восстановительных и водонасыщенных условий с малым размером камер, вероятно, не способствовало заметному накоплению Ti-Fe оксидов ни на одной из стадий кристаллизации расплава.

Дополнительным критерием слабой рудоносности ТГ являются экзоконтактные зоны интрузий. В отличие от экзоконтактов интрузий, для которых выявлены вторичные ореолы рассеяния халькофильных элементов, в экзоконтактах интрузий ТГ, которые детально изучены на примере массива Восточный Бускун (Михеев, Рахимов, 2025), геохимические аномалии и минералогические факторы оруденения отсутствуют. В массивах рудоносных шприсгеймитов внедрение ТГ приводило к растворению сульфидов и рассеянию их компонентов как внутри массива, так и за пределами (Рахимов и др., 2021). Еще одним критерием, указывающим на отсутствие рудного потенциала ТГ, является микроэлементный и галогенный состав аксессуарного апатита из ТГ (массива Северный Бускун) (Ra-

khimov, 2024). Таким образом, ТГ ХДК обладают слабым металлогеническим потенциалом, с этими породами вряд ли могут быть связаны залежи каких-либо руд. Однако ТГ ХДК привлекательны для строительного бизнеса в качестве поделочно-го (облицовочного) камня. В настоящее время эксплуатируются два карьера, в которых добываются как меланократовые, так и лейкократовые разновидности габбро. Однако массивы с хорошей блочностью немногочисленны в связи с интенсивными тектоническими нарушениями в регионе.

ВЫВОДЫ

Полученные результаты и их обсуждение позволили сформулировать основные выводы.

– Такситовые габбро широко представлены в худолазовском дифференцированном комплексе и в целом определяют его узнаваемый петрографический облик. Согласно петрографическим характеристикам, выделено три типа такситовых габбро: 1) пятнистые, в том числе шлировые, 2) пятнисто-полосчатые, 3) гибридные. Они почти не различаются по составу минералов и валовой геохимии, что указывает на единый источник расплава.

– Возникновение “такситовости” во многом обусловлено водонасыщенностью исходного расплава и динамикой его внедрения. Неоднородное распределение меланократовых и лейкократовых обособлений связано с многократным поступлением расплава в ограниченную по размерам интрузивную камеру и возникновением участков с разной степенью вязкости и закристаллизованности.

– Валовые геохимические характеристики пород вместе с изотопным составом Sr (0.70319–0.70396) и Nd ($\epsilon\text{Nd}_{(330)} = +4.59 \dots +6.72$) указывают на мантийный источник со смешанным типом между примитивной мантией и мантией надсубдукционного клина. Расчеты показали, что расплав мог быть до 7% контаминированным вмещающими породами из Магнитогорского островодужного террейна, что не сильно искажало условия кристаллизации первичной магмы.

– Согласно моделированию в программе Comagmat 3.75, примером исходного расплава являются габбро-долериты из маломощных силлов Худолазовской мульды. По данным моделирования и термобарометрии по роговой обманке, расплав кристаллизовался в диапазоне температур $\approx 1200 \dots 900^\circ\text{C}$ и давлении 2–5 кбар при начальном содержании воды >0.5 мас. %.

– Такситовые габбро худолазовского комплекса не рудоносны, включая богатые оливином разновидности. Это обусловлено как малыми размерами интрузий, так и составом пород и режимом контаминации. Вероятнее всего, что поиски и разведка в пределах интрузий такситовых габбро не имеют экономического смысла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бучковский Э.С., Перминов Г.М., Крестинин Б.А., Салихов Д.Н., Караваев И.Н. (1975) Оценка никеленосности основных интрузий худолазовского комплекса. Отчет по объекту: “Проверка рудоносности некоторых глубокозалегающих интрузий на Худолазовской площади”. В 2 т. Уфа: БТГУ. Инв. № 9292.
- Годлевский М.Н. (1959) Траппы и рудоносные интрузии Норильского района. М.: Госгеолтехиздат, 68 с.
- Ефимов А.А., Потапова Т.А. (2003) О природе европейской аномалии в габбро Платиноносного пояса Урала. *Тр. ИГГ УрО РАН*, вып. 150, 227-230.
- Знаменский С.Е. (2009) Структурные условия формирования коллизионных месторождений золота восточного склона Южного Урала. Уфа: Гилем, 348 с.
- Знаменский С.Е., Знаменская Н.М. (2009) Роль сдвиговых дуплексов в региональном структурном контроле позднепалеозойского золотого оруденения Магнитогорской мегазоны (Южный Урал). *Литосфера*, (4), 83-92.
- Золотухин В.В. (1997) Базитовые пегматоиды норильских рудоносных интрузивов и проблема генезиса платиноидно-медно-никелевого оруденения норильского типа Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГТМ, 88 с.
- Золотухин В.В. (1963) Вопросы механизма образования трапповой дифференцированной интрузии Норильск I (в связи с изучением ее магматических тектур). *Геология и геофизика*, 4(12), 48-62.
- Золотухин В.В. (1964) Основные закономерности протектоники и вопросы формирования рудоносных трапповых интрузий. М.: Наука, 203 с.
- Князев Ю.Г. (2011) Государственная геологическая карта Российской Федерации N-40 (Уфа). Третье поколение. Уральская сер. Геологическая карта доплиоценовых образований ОАО Башкиргеология, ФГБУ “ВСЕГЕИ”.
- Коровяков И.А., Нелюбин А.Е., Райкова З.А., Хортова Л.К. (1963) Происхождение норильских трапповых интрузий, несущих сульфидные медно-никелевые руды. М.: Госгеолтехиздат, 90 с.
- Кривоуцкая Н.А., Арискин А.А., Служеникин С.Ф., Туровцев Д.М. (2001) Геохимическая термометрия пород Талнахского интрузива: оценка состава расплава и степени раскристаллизованности исходной магмы. *Петрология*, 9(5), 451-479.
- Кривоуцкая Н.А., Гонгальский Б.И., Свирская Н.М., Кузьмин Д.В. (2025) Породообразующие минералы норильских рудоносных интрузивов как показатели петро- и рудогенеза. *Тр. Ферсмановской науч. сессии ГИ КНЦ РАН*, (22), 14-22. <https://doi.org/10.31241/FNS.2025.22.002>
- Лихачев А.П. (1965) Роль лейкократового габбро в формировании норильских дифференцированных интрузий. *Изв. АН СССР. Сер. Геол.*, (10), 75-88.
- Михайлов В.В., Степанов С.Ю., Козлов А.В., Петров С.В., Паламарчук Р.С., Шиловских В.В., Абрамова В.Д. (2021) Новое медно-благороднометалльное рудопроявление в габбро массива Серебрянского камня, Платиноносный пояс Урала (Северный Урал). *Геол. руд. месторождений*, 63(6), 520-550.
- 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.
- Монтин С.А., Левина Н.Б., Батрак И.Е. и др. (2015a) Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:200 000. Издание второе. Сер. Южно-Уральская. Лист N-40-XXIX – Сибай. Объясн. зап. М.: МФ ВСЕГЕИ. 218 с. + 14 вкл. (МПР России, Федеральное агентство по недропользованию, Управление по недропользованию по Челябинской области, ФГУНПП “Аэрогеология”).
- Монтин С.А., Левина Н.Б., Лаврович Н.Н. и др. (2015b) Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:200 000. Издание второе. Сер./Южно-Уральская. Лист N-40-XXXV (Баймак). Объясн. зап. М.: МФ ВСЕГЕИ. 188 с. + 14 вкл. (МПР России, Федеральное агентство по недропользованию, Управление по недропользованию по Челябинской области, ФГУНПП “Аэрогеология”).
- Наумов В.Б., Коваленко В.И., Дорофеева В.А., Гирнис А.В., Ярмолюк В.В. (2010) Средний состав магматических расплавов главных геодинамических обстановок по данным изучения расплавных включений в минералах и закалочных стеклах пород. *Геохимия*, (12), 1266-1288.
- Пучков В.Н. (2010) Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 280 с.
- Рахимов И.Р. (2025) Рассредоточенная расслоенность или синсдвиговая многофазная петрогенетическая модель Cu-Ni-PGE-рудоносного худолазовского дифференцированного комплекса на Южном Урале: пример синколлизонного ультрамафит-мафитового магматизма. *Ультрамафит-мафитовые комплексы: геология, петрология, рудный потенциал*. Матлы IX Всерос. конф. с междунар. участием. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 149-150.
- Рахимов И.Р., Вишневский А.В. (2023) Роговая обманка в ультрамафит-мафитах худолазовского комплекса Южного Урала: условия кристаллизации и петрологические следствия. *Литосфера*, 23(5), 766-784. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-5-766-784>
- Рахимов И.Р., Вишневский А.В., Савельев Д.Е., Салихов Д.Н., Владимиров А.Г. (2021) Полигенная (магматогенно-гидротермальная) сульфидно-платиноталльная минерализация худолазовского комплекса (Южный Урал). *Геол. руд. месторождений*, 63(4) 354-381. <https://doi.org/10.31857/S0016777021040067>
- Радько В.А. (1991) Модель динамической дифференциации интрузивных траппов северо-запада Сибирской платформы. *Геология и геофизика*, (11), 19-27.
- Роговер Г.Б. (1959) Месторождение Норильск-1, некоторые его особенности, могущие иметь поисковое значение, и рациональная методика его разведки. М.: Госгеолтехиздат, 168 с.
- Рябов В.В. (1969) О происхождении такситового габбро-долерита, лейкократового габбро и магматической брекчии хараелахской ветви Талнахской трапповой интрузии. *Геология и геофизика*, 10(2), 51-58.
- Салихов Д.Н., Пшеничный Г.Н. (1984) Магматизм и оруденение зоны ранней консолидации Магнитогорской эвгеосинклинали. Уфа: БФАН СССР, 112 с.
- Служеникин С.Ф., Малич К.Н., Григорьева А.В. (2018)

- Базит-гипербазитовые дифференцированные интрузивы круглогорского типа: петрология и рудоносность (Норильский район). *Петрология*, **26**(3), 282-316.
- Смолюкин В.Ф. (2003) Петрография магматических и метаморфических пород. Мурманск: Изд-во МГТУ, 281 с.
- Тевелев А.В., Кошелева И.А., Тевелев Арк. В., Яковишина Е.В. (2009) Государственная геологическая карта Российской Федерации м-ба 1:200 000 (издание второе). Сер. Южно-Уральская. Лист N-40-XXXVI. Объясн. зап. СПб.: ВСЕГЕИ, 200 с.
- Чайка И.Ф. (2023) Петрология малосульфидного хромит-платиноносного горизонта интрузии Норильск-1. Дисс. ... канд. геол.-мин. наук. Новосибирск, 237 с.
- Шарпёнок Л.Н., Костин А.Е., Кухаренко Е.А. (2013) TAS-диаграмма сумма щелочей–кремнезем для химической классификации и диагностики plutonических пород. *Регион. геол. и металлогения*, (56), 40-50.
- Bouvier A., Vervoort J.D., Patchett P.J. (2008) The Lu–Hf and Sm–Nd isotopic composition of CHUR: Constraints from unequilibrated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planets. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **273**(1–2), 48-57. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.06.010>.
- Brown D., Spadea P., Puchkov V.N., Alvarez-Marron J., Herrington R., Willner A.P., Hetzel R., Gorozhanina Ye.N., Juhlin C. (2006) Arc-continent collision in the Southern Urals. *Earth-Sci. Rev.*, **79**, 261-287.
- Deer W.A., Howie R., Zussman J. (1992) An Introduction to the Rock-Forming Minerals, 2nd ed.; Pearson Education Limited: L., UK, 1-712.
- Deer W.A., Howie R.A., Zussman J. (1997) Single-Chain Silicates. *Geol. Soc. Lond.*, 680 p.
- Ersoy E.Y., Helvacı C. (2010) FC–AFC–FCA and mixing modeler: A Microsoft® Excel® spreadsheet program for modeling geochemical differentiation of magma by crystal fractionation, crustal assimilation and mixing. *Comput. Geosci.*, **36**, 383-390. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2009.06.007>
- Faure P.B.G. (1986) Principles of Isotope Geology, 2nd ed. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore: John Wiley & Sons. xv + 589 p.
- Feig S.T., Koepke J., Snow J.E. (2006) Effect of water on tholeiitic basalt phase equilibria: an experimental study under oxidizing conditions. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **152**, 611-638. <https://doi.org/10.1007/s00410-006-0123-2>
- Goldstein S.J., Jacobsen S.B. (1988) Nd and Sr isotopic systematics of river water suspended material implications for crystal evolution. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **87**, 249-265.
- Hawthorne F.C., Oberti R., Harlow G.E., Maresch W.V., Martin R.F., Schumacher J.C., Welch M.D. (2012) Nomenclature of the amphibole supergroup. *Amer. Miner.*, **97**, 2031-2048.
- Higgins M.D., Morata D. (2019) Development of complex, sub-vertical layering in the Cortaderas gabbro intrusion, Central Chile. *Lithos*, **340–341**, 124-138. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.05.008>
- Leake B.E., Wooley A.R., Arps C.E.S., Birch W.D., Gilbert M.C., Grice J.D., Hawthorne F.C., Kato A., Kisch H.J., Krivovichev V.G., Linthout K., Laird J., Mandarino J., Maresch W.V., Nickel E.H., Rock N.M.S., Schumacher J.C., Stephenson N.C.N., Ungaretti L., Whit-taker E.J.W., Youzhi G. (1997) Nomenclature of amphiboles. Report of the Subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names. *Mineral. Mag.*, **61**, 295-321.
- Lyubetskaya T., Korenaga J. (2007) Chemical composition of earth's primitive mantle and its variance. *J. Geophys. Res.*, **112**, 1-21. <https://doi.org/10.1029/2005JB004224>
- Pearce J.A. (2008) Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. *Lithos*, **100**, 14-48.
- Presnall D., Dixon S.A., Dixon J.R., O'donnell T., Brenner N., Schrock R., Dycus D. (1978) Liquidus phase relations on the join diopside-forsterite-anorthite from 1 atm to 20 kbar: their bearing on the generation and crystallization of basaltic magma. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **66**(2), 203-220.
- Raczek I., Jochum K.P., Hofmann A.W. (2003) Neodymium and strontium isotope data for USGS reference materials BCR-1, BCR-2, BHVO-1, BHVO-2, AGV-1, AGV-2, GSP-1, GSP-2 and eight MPI-DING reference glasses. *Geostand. Geoanal. Res.*, **27**, 173-79. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2003.tb00644.x>
- Rakhimov I.R. (2024) Apatite in Pegmatoid Gabbro (Khudolaz Differentiated Complex, Southern Urals): Electron-Microprobe and LA-ICP-MS Geochemical Study in Context of Petrogenesis. *Minerals*, **14**, 1271. <https://doi.org/10.3390/min14121271>
- Rakhimov I.R., Kunakkuzin E.L., Vishnevskiy A.V., Soloshenko N.G., Kiseleva D.V. (2025) Disseminated layering or syn-shearing multi-phase petrogenetic model of Cu-Ni-PGE-bearing Khudolaz Differentiated complex in the Southern Urals: A case study of collisional ultramafic-mafic magmatism. *Lithos*, **516–517**, 108267. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2025.108267>
- Ridolfi F., Renzulli A., Puerini M. (2010) Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: an overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **160**, 45-66.
- Sereda E., Belyatsky B., Krivolutsкая N. (2020) Geochemistry and Geochronology of Southern Norilsk Intrusions, SW Siberian Traps. *Minerals*, **10**(2), 1-27. <https://doi.org/10.3390/min10020165>
- Sun S., McDonough W.F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geol. Soc., Lond.*, **42**, 313-345.
- Taylor S.R., McLennan S.M. (1995) The geochemical evolution of the continental crust. *Rev. Geophys.*, **33**(2), 241-265. <https://doi.org/10.1029/95RG00262>
- Tanaka T., Kamioka H., Togashi S., Dragusanu C. (2000) JNdi-1: A neodymium isotopic reference in consistency with LaJolla neodymium. *Chem. Geol.*, **168**, 279-281.

REFERENCES

- Bouvier A., Vervoort J.D., Patchett P.J. (2008) The Lu–Hf and Sm–Nd isotopic composition of CHUR: Constraints from unequilibrated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planets. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **273**(1–2), 48-57. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.06.010>
- Brown D., Spadea P., Puchkov V.N., Alvarez-Marron J., Herrington R., Willner A.P., Hetzel R., Gorozhanina Ye.N.,

- Juhlin C. (2006) Arc-continent collision in the Southern Urals. *Earth-Sci. Rev.*, **79**, 261-287.
- Buchkovskii E.S., Perminov G.M., Krestinin B.A., Salikhov D.N., Karavaev I.N. (1975) Evaluation of nickel content of main intrusions of the Khudolazovsky complex. Report on the project: "Checking the ore content of some deep-lying intrusions in the Khudolazovsky area". In 2 v. Ufa, BTGU. Inv. No. 9292. (In Russ.)
- Chaika I.F. (2023) Petrology of the low-sulfide chromite-platinum-bearing horizon of the Norilsk-1 intrusion. Diss. ... geol.-min. sci. Novosibirsk, 237 p. (In Russ.)
- Deer W.A., Howie R.A., Zussman J. (1997) Single-Chain Silicates. Geological Society of London, 680 p.
- Deer W.A., Howie R., Zussman J. (1992) An Introduction to the Rock – Forming Minerals, 2nd ed.; Pearson Education Limited. London, UK, 1-712.
- Efimov A.A., Potapova T.A. (2003) On the nature of the europium anomaly in the gabbro of the Ural platinum belt. *Tr. IGG UrO RAN*, vyp. 150, 227-230. (In Russ.)
- Ersay E.Y., Helvacı C. (2010) FC–AFC–FCA and mixing modeler: A Microsoft® Excel® spreadsheet program for modeling geochemical differentiation of magma by crystal fractionation, crustal assimilation and mixing. *Comput. Geosci.*, **36**, 383-390. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2009.06.007>
- Faure P.B.G. (1986) Principles of Isotope Geology. 2nd ed. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore: John Wiley & Sons, 589 p.
- Feig S.T., Koepke J., Snow J.E. (2006) Effect of water on tholeiitic basalt phase equilibria: an experimental study under oxidizing conditions. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **152**, 611-638. <https://doi.org/10.1007/s00410-006-0123-2>
- Godlevsky M.N. (1959) Traps and ore-bearing intrusions of the Norilsk region. Moscow, Gosgeoltekhizdat Publ., 68 p. (In Russ.)
- Goldstein S.J., Jacobsen S.B. (1988). Nd and Sr isotopic systematics of river water suspended material implications for crystal evolution. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **87**, 249-265.
- Hawthorne F.C., Oberti R., Harlow G.E., Maresch W.V., Martin R.F., Schumacher J.C., Welch M.D. (2012) Nomenclature of the amphibole supergroup. *Amer. Miner.*, **97**, 2031-2048.
- Higgins M.D., Morata D. (2019) Development of complex, sub-vertical layering in the Cortaderas gabbro intrusion, Central Chile. *Lithos*, **340–341**, 124-138. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.05.008>
- Knyazev Yu.G. (2011) State Geological Map of the Russian Federation N-40 (Ufa). Third Generation. Ural Series. Geological Map of Pre-Pliocene Formations of JSC Bashkirgeologiya, FGBU "VSEGEI". (In Russ.)
- Korovyakov I.A., Nelyubin A.E., Raikova Z.A., Khortova L.K. (1963) Origin of the Norilsk Trap Intrusions Bearing Sulfide Copper-Nickel Ores. Moscow, Gosgeoltekhizdat Publ., 90 p. (In Russ.)
- Krivolutskaya N.A., Ariskin A.A., Sluzhenikin S.F., Turovsev D.M. (2001) Geochemical thermometry of rocks of the Talnakh intrusion: assessment of melt composition and degree of crystallization of the initial magma. *Petrologiya*, **9**(5), 451-479. (In Russ.)
- Krivolutskaya N.A., Gongalsky B.I., Svirskaya N.M., Kuzmin D.V. (2025) Rock-Forming Minerals of the Norilsk Ore-Bearing Intrusions as Indicators of Petro- and Ore-Genesis. *Tr. Fersmanovskoi Nauchnoi Sessii GI KNTs RAN*, **22**, 14-22. (In Russ.) <https://doi.org/10.31241/FNS.2025.22.002>
- Leake B.E., Wooley A.R., Arps C.E.S., Birch W.D., Gilbert M.C., Grice J.D., Hawthorne F.C., Kato A., Kisch H.J., Krivovichev V.G., Linthout K., Laird J., Mandarino J., Maresch W.V., Nickel E.H., Rock N.M.S., Schumacher J.C., Stephenson N.C.N., Ungaretti L., Whitaker E.J.W., Youzhi G. (1997) Nomenclature of amphiboles. Report of the Subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names. *Mineral. Mag.*, **61**, 295-321.
- Likhachev A.P. (1965) The Role of Leucocratic Gabbro in the Formation of Norilsk Differentiated Intrusions. *Izv. AN SSSR. Ser. Geol.*, **10**, 75-88. (In Russ.)
- Lyubetskaya T., Korenaga J. (2007) Chemical composition of earth's primitive mantle and its variance. *J. Geophys. Res.*, **112**, 1-21. <https://doi.org/10.1029/2005JB004224>
- Mikhailov V.V., Stepanov S.Yu., Kozlov A.V. et al. (2021) New Copper-Precious Metal Occurrence in Gabbro of the Serebryansky Kamen Massif, Ural Platinum Belt, Northern Urals. *Geol. Ore Depos.*, **63**, 528-555 (translated from *Geol. Rud. Mestorozhd.*, **63**(6), 520-550). <https://doi.org/10.1134/S1075701521060040>
- Mikheev E.I., Rakhimov I.R. (2025) Mineralogical and geochemical zoning and mass transfer between water-saturated gabbro of the Khulozovsky complex and sandstones of the Zilair suite (Eastern Buskun, Southern Urals). *Lithosphere (Russia)*, **25**(6), 1298-1323. (In Russ.)
- Montin S.A., Levina N.B., Batrak I.E. et al. (2015a) 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 Directorate for Chelyabinsk Region, FSUE "Aerogeologiya"). (In Russ.)
- Montin S.A., Levina N.B., Lavrovich N.N. et al. (2015b) State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:200,000. Second edition. South Ural Series. Sheet N-40-XXXV (Baymak). Explanatory Note. Moscow, MF VSEGEI Publ. 188 p. + 14 incl. (Ministry of Natural Resources of Russia, Federal Agency for Subsoil Use, Subsoil Use Directorate for the Chelyabinsk Region, FSUE Aerogeologiya). (In Russ.)
- Naumov V.B., Kovalenko V.I., Dorofeeva V.A. et al. (2010) Average compositions of igneous melts from main geodynamic settings according to the investigation of melt inclusions in minerals and quenched glasses of rocks. *Geochem. Int.*, **48**, 1185-1207. <https://doi.org/10.1134/S0016702910120049>
- Puchkov V.N. (2010) Geology of the Urals and Pre-Urals (Current Issues of Stratigraphy, Tectonics, Geodynamics, and Metallogeny). Ufa, DizainPoligrafServis Publ., 280 p. (In Russ.)
- Pearce J.A. (2008) Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. *Lithos*, **100**, 14-48.
- Presnall D., Dixon S.A., Dixon J.R., O'donnell T., Brenner N., Schrock R., Dycus D. (1978) Liquidus phase relations on the join diopside-forsterite-anorthite from 1 atm to 20 kbar: their bearing on the generation and crystallization of basaltic magma. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **66**(2), 203-220.
- Raczek I., Jochum K.P., Hofmann A.W. (2003) Neodymium and strontium isotope data for USGS reference materi-

- als BCR-1, BCR-2, BHVO-1, BHVO-2, AGV-1, AGV-2, GSP-1, GSP-2 and eight MPI-DING reference glasses. *Geostand. Geoanal. Res.*, **27**, 173-179. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2003.tb00644.x>
- Rad'ko V.A. (1991) A Model for the Dynamic Differentiation of Intrusive Traps in the Northwest Siberian Platform. *Geol. Geofiz.*, (11), 19-27. (In Russ.)
- Rakhimov I.R. (2024) Apatite in Pegmatoid Gabbro (Khudolaz Differentiated Complex, Southern Urals): Electron-Microprobe and LA-ICP-MS Geochemical Study in Context of Petrogenesis. *Minerals*, **14**, 1271. <https://doi.org/10.3390/min14121271>
- Rakhimov I.R. (2025) Distributed Layering or Syn-Strike-Slip Multiphase Petrogenetic Model of the Cu-Ni-PGE-Ore-Bearing Khudolazsky Differentiated Complex in the Southern Urals: An Example of Syncollisional Ultramafic-Mafic Magmatism. *Ultramafic-Mafic Complexes: Geology, Petrology, Ore Potential*. Proc. of the IX All-Russ. Conf. with int. participation. Ekaterinburg, IGG, UB RAS, 149-150. (In Russ.)
- Rakhimov I.R., Kunakkuzin E.L., Vishnevskiy A.V., Soloshenko N.G., Kiseleva D.V. (2025) Disseminated layering or syn-shearing multi-phase petrogenetic model of Cu-Ni-PGE-bearing Khudolaz Differentiated complex in the Southern Urals: A case study of collisional ultramafic-mafic magmatism. *Lithos*, **516–517**, 108267. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2025.108267>
- Rakhimov I.R., Vishnevskiy A.V. (2023) Hornblende in ultramafic-mafic rocks of the Khudolaz Complex of the Southern Urals: Crystallization conditions and petrological implications. *Lithosphere (Russia)*, **23**(5), 766-784. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-5-766-784>
- Rakhimov I.R., Vishnevskiy A.V., Saveliev D.E., Salikhov D.N., Vladimirov A.G. (2021) Multi-Stage Magmatic-Hydrothermal Sulfide-PGE Mineralization of the Khudolaz Complex (South Urals). *Geol. Ore Depos.*, **63**, 341-367 (translated from *Geol. Rud. Mestorozhd.*, **63**(4) 354-381). <https://doi.org/10.1134/S1075701521040061>
- Ridolfi F., Renzulli A., Puerini M. (2010) Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: an overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **160**, 45-66.
- Rogover G.B. (1959) The Norilsk-I Deposit, Some of Its Features That May Have Search Significance, and a Rational Method for Its Exploration. Moscow, Gosgeologtekhizdat Publ., 168 p. (In Russ.)
- Ryabov V.V. (1969) On the Origin of Taxite Gabbro-Dolerite, Leucocratic Gabbro, and Igneous Breccia of the Kharaelakh Branch of the Talnakh Trap Intrusion. *Geol. Geofiz.*, **10**(2), 51-58. (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.)
- Sereda E., Belyatsky B., Krivolutsкая N. (2020) Geochemistry and Geochronology of Southern Norilsk Intrusions, SW Siberian Traps. *Minerals*, **10**(2), 1-27. <https://doi.org/10.3390/min10020165>
- Sharpenok L.N., Kostin A.E., Kukharensko E.A. (2013) TAS-diagram sum of alkalis-silica for chemical classification and diagnostics of plutonic rocks. *Region. Geol. i Metallogeniya*, (56), 40-50. (In Russ.)
- Sluzhenikin S.F., Malitch K.N., Grigor'eva A.V. (2018) Differentiated Mafic-Ultramafic Intrusions of the Kruglogorsky Type in the Noril'sk Area: Petrology and Ore Potential. *Petrology*, **26**, 280-313 (translated from *Petrologiya*, **26**(3), 282-316). <https://doi.org/10.1134/S0869591118030050>
- Smol'kin V.F. (2003) Petrography of igneous and metamorphic rocks. Murmansk, Izd-vo VGTU Publ., 281 p. (In Russ.)
- Sun S., McDonough W.F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geol. Soc., Lond.*, **42**, 313-345.
- Tanaka T., Kamioka H., Togashi S., Dragusanu C. (2000) JNdi-1: A neodymium isotopic reference in consistency with LaJolla neodymium. *Chem. Geol.*, **168**, 279-281.
- Taylor S.R., McLennan S.M. (1995) The geochemical evolution of the continental crust, *Rev. Geophys.*, **33**(2), 241-265. <https://doi.org/10.1029/95RG00262>
- Tevelev A.V., Kosheleva I.A., Tevelev Ark.V., Yakovishina E.V. (2009) State Geological Map of the Russian Federation, scale 1:200,000 (second edition). South Ural Series. Sheet N-40-XXXVI. Explan. note. St.Petersburg, VSEGEI Publ., 200 p. (In Russ.)
- Znamenskii S.E., Znamenskaya N.M. (2009) The role of strike-slip duplexes in the regional structural control of the late Paleozoic gold mineralization of the Magnitogorsk megazone (Southern Urals). *Lithosphere (Russia)*, (4), 83-92. (In Russ.)
- Znamenskii S.E. (2009) Structural conditions of the formation of collisional gold deposits on the eastern slope of the Southern Urals. Ufa, Gilem Publ., 348 p. (In Russ.)
- Zolotukhin V.V. (1997) Mafic pegmatoids of the Norilsk ore-bearing intrusions and the problem of the genesis of platinoid-copper-nickel mineralization of the Norilsk type Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, NITs OIGGM Publ., 88 p. (In Russ.)
- Zolotukhin V.V. (1963) The formation mechanism of the Norilsk I differentiated trap intrusion (in connection with the study of its igneous textures). *Geol. Geofiz.*, **4**(12), 48-62. (In Russ.)
- Zolotukhin V.V. (1964) The main patterns of prototectonics and the formation of ore-bearing trap intrusions. Moscow, Nauka Publ., 203 p. (In Russ.)