

УДК 553.24:553.41

DOI: 10.24930/2500-302X-2025-25-1-114-133

## Минералогия и петрогенезис интрузивных пород Кутуевского Au-Cu-порфирового рудопоявления (Южный Урал)

С. Е. Знаменский

Институт геологии УФИЦ РАН, 450077, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 16/2, e-mail: Znamensky\_Sergey@mail.ru

Поступила в редакцию 14.02.2024 г., принята к печати 25.04.2024 г.

**Объект исследований.** Минералогия, петролого-геохимические особенности и условия формирования габбро-диоритов и диоритов, слагающих рудоносные интрузии Кутуевского Au-Cu-порфирового рудопоявления в зоне Главного Уральского разлома на Южном Урале. **Методы.** Содержание петрогенных оксидов определялось методом “мокрой химии”, редких элементов – методами ICP-MS на масс-спектрометре ELAN 9000 и ICP-AES на масс-спектрометре ICPE-9000. Изучение химического состава минералов производилось на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega Compact с энергодисперсионным анализатором Xplorer 15 Oxford Instruments. **P-T** параметры образования оценены с помощью минеральных геотермобарометров. **Результаты и выводы.** Породообразующими минералами габбро-диоритов и диоритов являются плагиоклаз, первичный состав которого был близок к андезину ( $An = 32.83\text{--}34.43\%$ ), и клинопироксен, представленный авгитом ( $Wo_{43.9\text{--}44.0}En_{45.2\text{--}45.5}Fs_{10.6\text{--}10.8}$ ) и диопсидом ( $Wo_{45.2\text{--}47.9}En_{42.1\text{--}44.8}Fs_{9.2\text{--}10.3}$ ). Среди аксессуарных минералов установлены циркон, магнетит, титанит, апатит, титаномагнетит. Клиннопироксен в значительной степени замещен зеленой роговой обманкой (6.956–7.169 ф.к. Si, 0.73–0.76 Mg/(Mg + Fe<sup>2+</sup>)), генетическая природа которой не установлена. Кристаллизация клинопироксена происходила при  $T = 1010\text{--}1072^\circ\text{C}$  и  $P = 1.35\text{--}1.78$  кбар. Показано, что интрузивные породы Кутуевского рудопоявления и других порфировых проявлениях зоны ГУР на Южном Урале имеют близкие петрогеохимические характеристики, которые соответствуют магматическим породам, формирующимся на ранних стадиях развития энсиматических островных дуг. Они обладают умеренно-калиевым составом, имеют нормальную щелочность, известково-щелочной или переходный толеитовый – известково-щелочной состав. В качестве источника магм для габбро-диоритов и диоритов рудопоявления предполагаются шпинелевые перидотиты литосферной мантии, метасоматизированные субдукционными флюидами. Процессы коровой контаминации также оказывали влияние на состав.

**Ключевые слова:** Южный Урал, Au-Cu-порфировое оруденение, интрузивные породы, клинопироксен, шпинелевые перидотиты, температура кристаллизации

### Источник финансирования

Работа выполнена в рамках программы государственного заказа ИГ УФИЦ РАН № FMRS-2025-0014

## Mineralogy and petrogenesis of intrusive rocks of the Kutuevsky Au-Cu-porphyry ore occurrence (Southern Urals)

Sergey E. Znamensky

Institute of Geology, UFRS RAS, 16/2 Karl Marx st., Ufa 450077, Russia, e-mail: Znamensky\_Sergey@mail.ru

Received 14.02.2024, accepted 25.04.2024

**Research subject.** Mineralogical, petrological and geochemical features and formation conditions of gabbro-diorites and diorites composing the ore-bearing intrusions of the Kutuevsky Au-Cu porphyry ore occurrence in the Main Uralian Fault zone (Southern Urals). **Materials and Methods.** The content of rock-forming oxides was determined by the wet chemistry analysis, trace elements – by ICP-MS (ELAN 9000 mass spectrometer) and ICP-AES (ICPE-9000 atomic emission spectrometer). The study of the chemical composition of minerals was carried out using a Tescan Vega Compact scanning electron microscope with an Oxford Instruments Xplorer 15 energy-dispersive analyzer. **P-T** formation parameters were assessed using mineral geothermobarometers. **Results and conclusions.** The rock-forming minerals of gabbro-diorites and diorites are plagioclase with primary composition close to andesine ( $An = 32.83\text{--}34.43\%$ ) and clinopyroxene, represented by augite ( $Wo_{43.9\text{--}44.0}En_{45.2\text{--}45.5}Fs_{10.6\text{--}10.8}$ ) and diopside ( $Wo_{45.2\text{--}47.9}En_{42.1\text{--}44.8}Fs_{9.2\text{--}10.3}$ ). Accessory minerals

**Для цитирования:** Знаменский С.Е. (2025) Минералогия и петрогенезис интрузивных пород Кутуевского Au-Cu-порфирового рудопоявления (Южный Урал). *Литосфера*, **25**(1), 114-133. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-1-114-133>. EDN: CDRSBY

**For citation:** Znamensky S.E. (2025) Mineralogy and petrogenesis of intrusive rocks of the Kutuevsky Au-Cu-porphyry ore occurrence (Southern Urals). *Lithosphere (Russia)*, **25**(1), 114-133. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-1-114-133>. EDN: CDRSBY

include zircon, magnetite, titanite, apatite, and titanomagnetite. Clinopyroxene is largely replaced by green hornblende (6.956–7.169 a.f.u. Si, 0.73–0.76 Mg/(Mg+Fe<sup>2+</sup>)) of unknown genetic nature. Clinopyroxene crystallization occurred at T = 1010–1072°C and P = 1.35–1.78 kbar. The intrusive rocks of the Kutuevsky ore occurrence and other porphyry occurrences of the MUF zone in the Southern Urals have similar petro-geochemical characteristics that correspond to igneous rocks formed at the early stages of development of ensimatic island arcs. They have a moderate potassium composition, normal alkalinity, calc-alkaline or transitional tholeiitic-calc-alkaline composition. Spinel peridotites of the lithospheric mantle, metasomatized by subduction fluids, are assumed to be the source of magmas for gabbro-diorites and diorites of the ore occurrence. Crust contamination processes also influenced the composition.

**Keywords:** Southern Urals, Au-Cu porphyry mineralization, intrusive rocks, clinopyroxene, spinel peridotites, crystallization temperature

**Funding information**

The work was performed within the scientific program of IG UFRS RAS No. FMRS-2025-0014

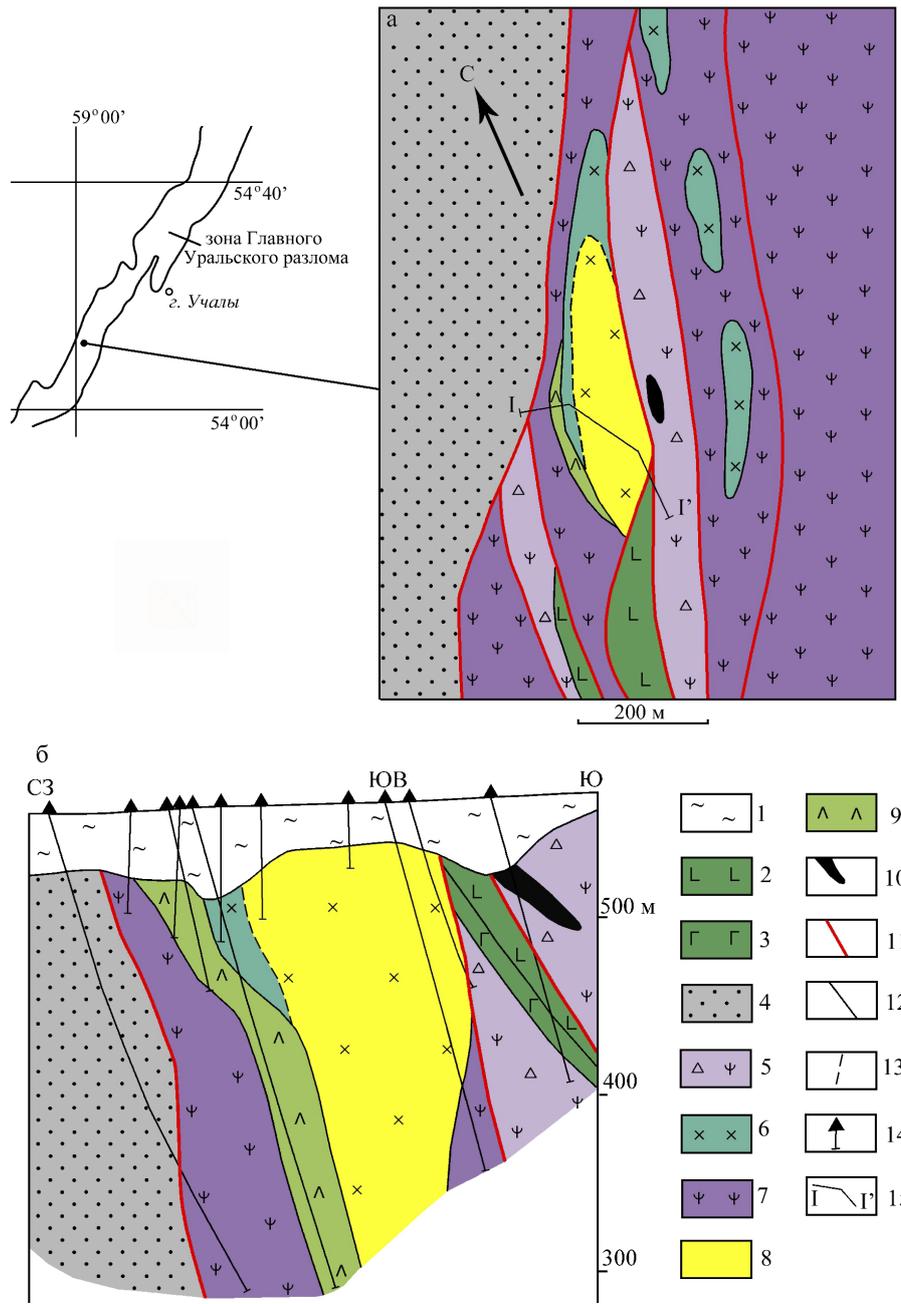
## ВВЕДЕНИЕ

Кутуевское рудопоявление расположено в зоне Главного Уральского разлома (ГУР) на северном замыкании Магнитогорской мегазоны Южного Урала (рис. 1). В этой части сутурной зоны известно еще несколько небольших месторождений и рудопоявлений, относящихся к порфирово-эпитермальному семейству (Салаватское, Вознесенское, Медногорское, Николаевское и др.) (Кривцов, 1983; Грабежев, Белгородский, 1992; Знаменский, Холоднов, 2018; и др.). Возраст и условия их образования являются предметом дискуссии. После работ геологов ЦНИГРИ, проведенных в 70–80 гг. прошлого столетия (Кривцов, 1983; Шишаков и др., 1988; и др.), сложились устойчивые представления о том, что порфировое оруденение связано здесь с интрузиями, коагматичными вулканитам ирендыкской базальт-андезибазальтовой формации (D<sub>2</sub>), которая образовалась (Серавкин и др., 1992) в условиях развитой островной дуги. Эта точка зрения остается популярной до настоящего времени и нашла отражение в результатах прогнозно-металлогенического районирования территории Южного Урала, недавно выполненного группой сотрудников ЦНИГРИ (Андреев и др., 2018).

Вместе с тем в последние годы были опубликованы данные по изотопному возрасту и петролого-геохимическим особенностям рудоносных интрузий, свидетельствующие о том, что порфировое оруденение начало формироваться в зоне ГУР на Южном Урале уже в раннем девоне на начальных стадиях развития Магнитогорской палеостровной дуги (Знаменский и др., 2019; Плотинская, 2023; и др.). В частности, О.Ю. Плотинской (2023) для молибденита Вознесенского месторождения, относящегося к эталонным Cu-порфировым объектам, связанным с ирендыкским магматизмом (Кривцов, 1983), получены Re-Os датировки  $396 \pm 6$  и  $394 \pm 6$  млн лет. В современных геохронологических схемах они соответствуют позднему эмсу.

Степень изученности рудоносных интрузивных комплексов порфировых проявлениях зоны ГУР является невысокой. Практически отсутствуют данные по минералогии и физико-химическим параметрам образования интрузивных пород. Сведения об их химическом составе зачастую базируются только на единичных анализах.

Цель настоящей статьи – рассмотреть минералогию, петролого-геохимические особенности и условия формирования рудоносных интрузивных пород Кутуевского рудопоявления.



**Рис. 1.** Схема геологического строения (а) и разрез по линии I-I' (б) Кутуевского рудопроявления (составлены с использованием данных ОАО “Башкиргеология”).

1 – кора выветривания; 2 – пироксен-плаггиофировые базальты и андезитобазальты; 3 – афировые и плаггиофировые долериты; 4 – терригенно-тефроидные гравелиты, песчаники, алевролиты, яшмоиды и обломочные известняки; 5 – серпентинитокластические брекчии и офиокальциты; 6 – габбро-диориты и диориты; 7 – массивные серпентиниты; 8 – зона штокверковой сульфидно-кальцитовой минерализации; 9 – листвениты; 10 – колчеданные руды; 11 – разломы; 12 – геологические границы; 13 – границы зоны штокверковой минерализации; 14 – скважины; 15 – линия геологического разреза I-I'.

**Fig. 1.** Scheme of the geological structure (a) and section along profile I-I' (б) of the Kutuevsky occurrence (compiled using data from OJSC “Bashkirgeology”).

1 – weathering crust; 2 – pyroxene-plagiophyre basalts and basaltic andesites; 3 – aphyric and plagiophyric dolerites; 4 – terrigenous-tephroid gritstones, sandstones, siltstones, jasper rocks and clastic limestones; 5 – serpentinitoclastic breccia and ophiolites; 6 – gabbro-diorites and diorites; 7 – massive serpentinites; 8 – zone of stockwork sulfide-calcite mineralization; 9 – listwanites; 10 – massive sulfide ores; 11 – faults; 12 – geological boundaries; 13 – boundaries of the stockwork mineralization zone; 14 – boreholes; 15 – geological section line I-I'.

## КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РУДОПРОЯВЛЕНИЯ

Современная структура рудопоявления представляет собой пакет тектонических пластин крутого юго-восточного падения, ограниченных разрывными нарушениями неизвестной кинематической природы (см. рис. 1). Отдельные пластины сложены терригенно-тефроидными породами с прослоями яшмоидов и обломочных известняков, близкими по литолого-фациальному составу к ильтибановской толще ( $D_{1lh}$ ) (Маслов, Артюшкова, 2010), массивными серпентинитами, серпентинитокластическими брекчиями эдафогенной природы с горизонтами офиокальцитов, местами перекрытыми маломощными толщами афировых и плагиофириковых долеритов, пироксен-плагиофириковых базальтов и андезибазальтов. Серпентинитокластические эдафогенные брекчии имеют в пределах южноуральского сегмента зоны ГУР региональное распространение и залегают в основании разреза баймак-бурибаевской свиты ( $D_{1e_2}$ ) (Знаменский и др., 2019). В этих брекчиях локализованы многочисленные мелкие Co-Cu-колчеданные месторождения ивановского типа (Ивановское, Дергамышское, Ишкининское и др.) (Серавкин и др., 1992). На Кутуевском рудопоявлении в серпентинитокластических брекчиях, слагающих одну из тектонических пластин, расположено несколько небольших линз массивных Co-Cu-колчеданных руд пирит-пирротин-халькопиритового состава.

По результатам поисковых буровых работ в пределах рудопоявления выявлена серия дайкообразных в плане тел габбро-диоритов и диоритов. Они имеют длину по простиранию 200–350 м при ширине до 150 м. Контакты интрузивных тел с вмещающими породами, как правило, нарушены разрывными нарушениями.

Основная рудная зона рудопоявления приурочена к наиболее крупному телу габбро-диорит-диоритового состава, залегающему среди серпентинитов в центральной части рудопоявления. Она представляет собой сульфидно-кальцит-кварцевый штокверк. Внутри интрузивного тела рудный штокверк приурочен к зоне хлорит-серицит-кварцевых метасоматитов и иногда выходит за ее пределы в пропилизированные габбро-диориты и диориты. Пропилиты относятся к эпидот-актинолитовой фации. Вдоль западного контакта рудоносной интрузии местами развиты листовиты фуксит-карбонат-кварцевого состава, которые наложены на Au-Cu-порфировую минерализацию.

По данным микротермометрических исследований (Znamensky et al., 2022) флюидные включения в кальците рудных прожилков гомогенизируются при 220–300°C, а в формировавшемся позднее кварце – при 220–270°C. Рудные минералы представлены пиритом, халькопиритом, халько-

зинном, молибденитом, сфалеритом, галенитом, кобальтином, теллуридами Ag, Pb и Bi, самородным золотом.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Образцы для исследований были отобраны из керна поисковых скважин. Содержание петрогенных компонентов в породах определялось в химической лаборатории ИГ УНЦ РАН (Уфа, аналитик С.А. Ягудина) методом “мокрой химии”. Определение редких элементов выполнено методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на квадрупольном масс-спектрометре ELAN 9000 в лаборатории физических и химических методов исследований ИГГ УрО РАН (Екатеринбург, аналитик Д.В. Киселева), а также частично методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на спектрометре ICP-AES-9000 в ЦКД КМТНХ АО ИНХП (Уфа, аналитик А.М. Карамова).

Определение химического состава минералов проводилось в Институте геологии УФИЦ РАН на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega Compact с энергодисперсионным анализатором Xplorer 15 Oxford Instruments (аналитик С.С. Ковалев). Обработка спектров осуществлялась автоматически при помощи программного пакета Az Tec One с использованием методики TrueQ.

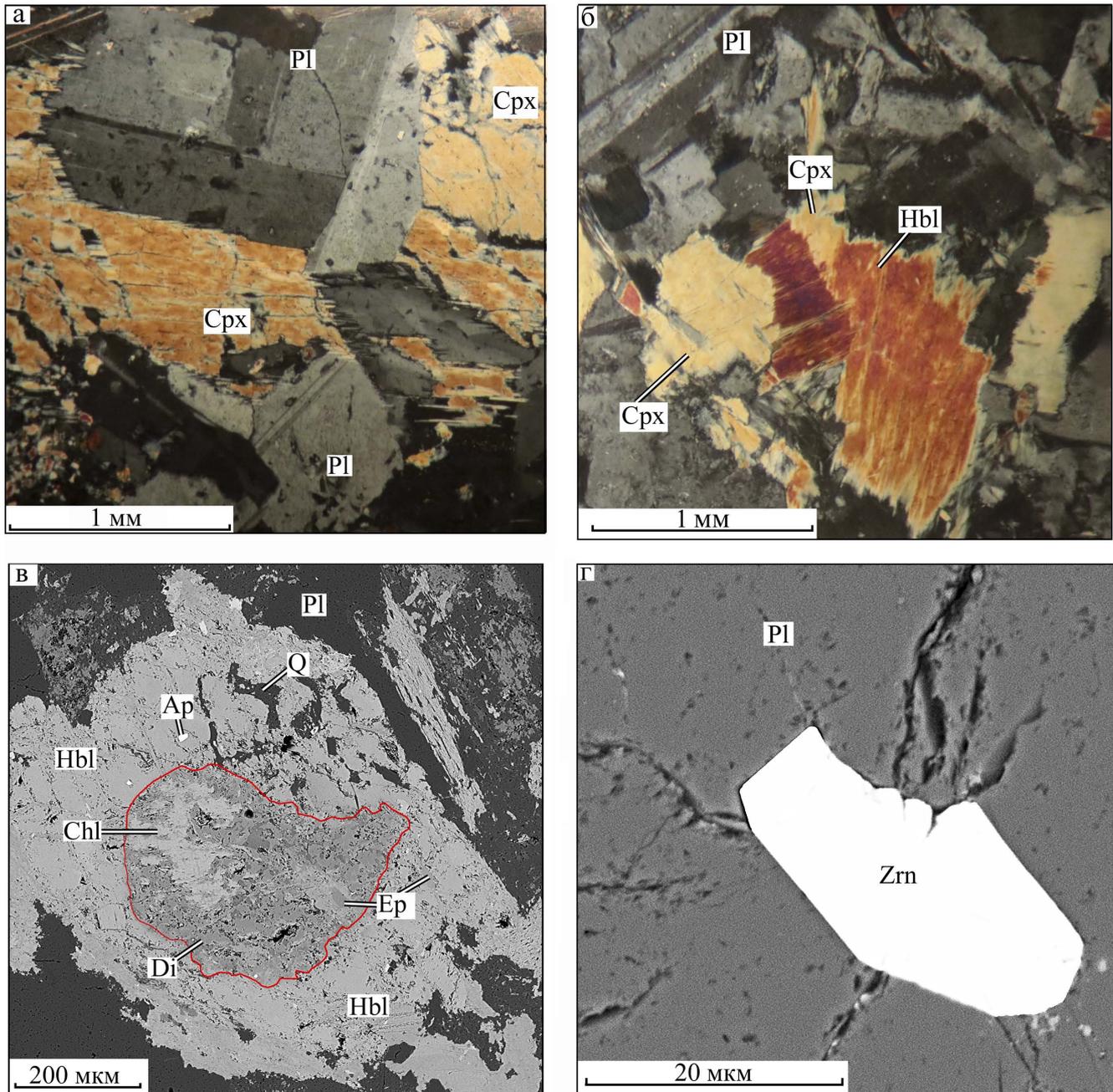
## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

### Минеральный состав

Габбро-диориты и диориты представляют собой мелкозернистые иногда среднезернистые породы с массивной текстурой. Основными породообразующими минералами являются плагиоклаз, клинопироксен и роговая обманка, плеохроирующая в зеленых тонах. В незначительных количествах присутствует кварц (до 5%). Преобладают породы с порфировидной структурой, которая обусловлена наличием фенокристаллов плагиоклаза. Основная масса имеет главным образом призматическозернистую структуру с преобладанием идиоморфизма плагиоклаза над моноклинным пироксеном (рис. 2а).

Плагиоклаз, как правило, полностью замещен альбитом ( $An = 5.31–6.47\%$ ) (табл. 1). Только в центральных зонах некоторых кристаллов сохранились реликтовые участки, по всей вероятности приближающиеся по составу к первичному плагиоклазу. По содержанию анортитовой компоненты ( $An = 32.83–34.43\%$ ) плагиоклаз на этих участках соответствует андезину.

Клинопироксен по химическому составу разделяется на диопсид ( $Wo_{45.2–47.9}En_{42.1–44.8}Fs_{9.2–10.3}$ ) и авгит ( $Wo_{43.9–44.0}En_{45.2–45.5}Fs_{10.6–10.8}$ ) (табл. 2; рис. 3).



**Рис. 2.** Минералы интрузивных пород и их взаимоотношения.

Изображения: а, б – в проходящем поляризованном свете; в, г – в обратнорассеянных электронах. а – идиоморфные кристаллы плагиоклаза в диорите, интерстиции между которыми выполнены клинопироксеном; б – замещение клинопироксена зеленой роговой обманкой в габбро-диорите; в – реликтовый участок диопсида (выделен красной линией) в роговой обманке, по диопсиду и роговой обманке развиваются минералы пропилитов (хлорит и эпидот); г – кристалл циркона в плагиоклазе. *Pl* – плагиоклаз, *Cpx* – клинопироксен, *Di* – диопсид, *Hbl* – роговая обманка, *Q* – кварц, *Ap* – апатит, *Zrn* – циркон, *Ep* – эпидот, *Chl* – хлорит.

**Fig. 2.** Minerals of intrusive rocks and their relationships.

Images: а, б – in transmitted polarization light; в, г – in back-scattered electrons. а – euhedral plagioclase crystals in diorite, the interstices between which are made of clinopyroxene; б – replacement of clinopyroxene by green hornblende in gabbro-diorite; в – relict area of diopside (highlighted by a red line) in hornblende, propylite minerals (chlorite and epidote) develop along diopside and hornblende; г – zircon crystal in plagioclase. *Pl* – plagioclase, *Cpx* – clinopyroxene, *Di* – diopside, *Hbl* – hornblende, *Q* – quartz, *Ap* – apatite, *Zrn* – zircon, *Ep* – epidote, *Chl* – chlorite.

**Таблица 1.** Представительные химические анализы плагиоклаза (мас. %) и его кристаллохимические характеристики  
**Table 1.** Representative chemical analyzes of plagioclase (wt %) and its crystal chemical characteristics

Компонент/спектр	36	39	47	119	121
SiO <sub>2</sub>	68.38	68.18	68.22	59.33	59.64
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.90	19.69	19.84	24.80	25.52
FeO	0.40	0.40	0.14	0.21	0.26
CaO	1.32	1.31	1.21	7.23	7.01
Na <sub>2</sub> O	10.04	9.95	10.01	7.85	7.12
K <sub>2</sub> O	0.10	0.41	–	0.49	0.33
Сумма	100.08	99.63	99.43	99.91	99.88
Si	2.987	2.984	2.986	2.661	2.662
Al	1.024	1.015	1.026	1.31	1.341
Fe	0.016	0.016	0.005	0.008	0.011
Ca	0.048	0.06	0.058	0.348	0.335
Na	0.851	0.847	0.852	0.685	0.617
K	0.005	0.021	–	0.027	0.021
An, %	5.31	6.47	6.37	32.83	34.43
Ab, %	94.14	91.27	93.63	64.62	63.41
Or, %	0.55	2.26	–	2.55	2.16

Примечание. Формульные коэффициенты рассчитаны на 8 O. Спектры 36, 39, 47 – альбит, 119, 121 – андезин.  
 Note. Formula coefficients are calculated for 8 O. Spectra 36, 39, 47 – albite, 119, 121 – andesine.

**Таблица 2.** Представительные химические анализы клинопироксена (мас. %) и его кристаллохимические характеристики  
**Table 2.** Representative chemical analyzes of clinopyroxene (wt %) and its crystal chemical characteristics

Компонент/образец	302/68-105	302/83-111	302/68-108	333/165-153	302/83-157	302/83-161
SiO <sub>2</sub>	54.39	54.38	55.26	54.95	54.68	54.91
TiO <sub>2</sub>	–	–	–	–	–	–
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.24	1.25	0.72	0.96	1.08	0.92
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.13	0.17	–	–	–	0.10
FeO	6.39	6.41	5.35	6.29	6.12	6.04
MgO	15.75	15.83	14.76	14.52	15.24	15.69
MnO	0.28	0.18	0.24	–	0.23	0.18
CaO	21.34	21.26	22.92	22.83	22.17	22.06
Na <sub>2</sub> O	0.16	0.15	0.23	0.27	0.20	0.25
Сумма	99.68	99.63	99.48	99.82	99.68	100.15
Si	2.011	2.011	2.048	2.036	2.017	2.019
Al	0.054	0.054	0.031	0.042	0.047	0.04
Fe	0.197	0.198	0.166	0.195	0.189	0.186
Mg	0.868	0.873	0.815	0.802	0.838	0.86
Mn	0.009	0.006	0.008	–	0.007	0.000
Ca	0.845	0.842	0.91	0.906	0.876	0.869
Na	0.011	0.011	0.022	0.019	0.019	0.018
Cr	0.004	0.005	–	–	0.007	0.003
Fe/(Fe + Mg)	0.18	0.18	0.17	0.20	0.18	0.18
Wo	44.00	43.90	47.90	47.60	45.90	45.2
En	45.20	45.50	42.90	42.10	43.90	44.80
Fs	10.80	10.60	9.20	10.30	10.20	10.00
K <sub>D</sub> Fe/Mg	0.27	0.27	0.26	0.26	0.27	0.27
T, °C (Putirka, 2008)	1010	1061	1048	1067	1068	1072
P, кбар (Wang et al., 2021)	1.78	1.73	1.35	1.36	1.57	1.71

Примечание. Формульные коэффициенты рассчитаны на 6 O.  
 Note. Formula coefficients are calculated at 6 O.

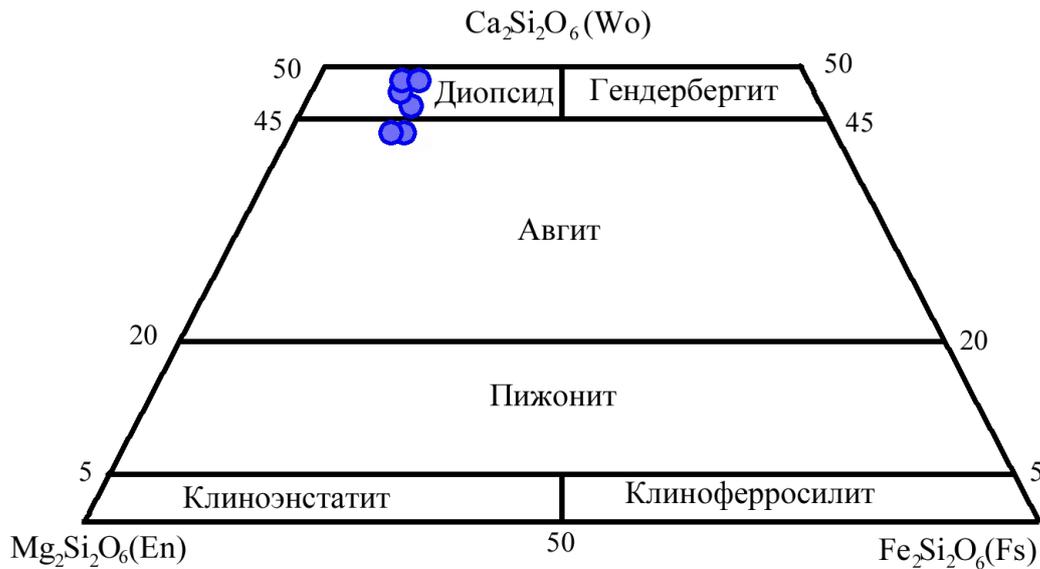


Рис. 3. Классификационная диаграмма для клинопироксена (Morimoto et al., 1988).

Fig. 3. Classification diagram for clinopyroxene (Morimoto et al., 1988).

Обе разновидности моноклинного пироксена имеют невысокие концентрации  $Al_2O_3$  (0.72–1.25%), низкую железистость ( $Fe\# = 0.17–0.2$ ) и не содержат Ti. Обычно клинопироксен в большей или меньшей степени замещен зеленой роговой обманкой нередко совместно с кварцем (см. рис. 2б, в). Роговая обманка представлена магниальной разновидностью (6.956–7.169 a.f.u. Si, 0.73–0.76 Mg/(Mg +  $Fe^{2+}$ )) (табл. 3, рис. 4). Содержание  $TiO_2$  в ней варьирует от 0.72 до 1.0%, а  $Al_2O_3$  – от 5.82 до 6.86%. Общая железистость составляет 0.43–0.45. Клинопироксен и роговая обманка часто замещаются темноцветными минералами пропилитов (эпидотом, актинолитом и хлоритом) (см. рис. 2в).

Акцессорные минералы представлены цирконом, магнетитом, титанитом, апатитом и крайне редко встречающимся титаномagnetитом. Циркон образует главным образом мелкие выделения неправильной формы размером в первые микрометры, которые почти нацело замещены торитом (17.94–18.22%  $SiO_2$ , 2.05–2.76%  $Al_2O_3$ , 1.19–1.76%  $ZrO_2$ , 67.79–69.19  $ThO_2$ , 0.34–1.45%  $UO_2$ ,  $n = 5$ ). В двух образцах (302/83 333/165) нами обнаружены слабо измененные кристаллы размером 15–20 мкм с элементами бипирамидально-призматического строения (см. рис. 2г). Электронно-микроскопический анализ показал, что центральные и краевые зоны этих кристаллов имеют разный химический состав (табл. 4). Центральные зоны кристаллов по сравнению с краевыми обогащены U, Th и Hf. Представительные анализы других акцессорных минералов приведены в табл. 5.

### Петрогеохимическая характеристика

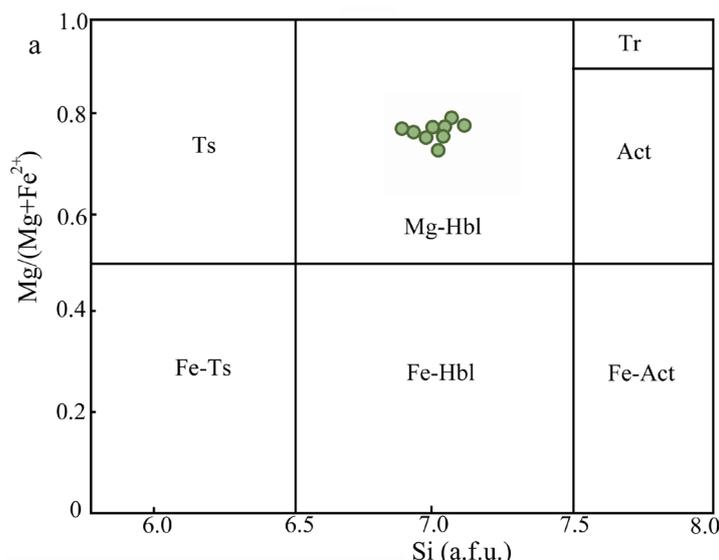
Содержание  $SiO_2$  в габбро-диоритах составляет 53.2–56.2%, в диоритах – 57–57.8% (табл. 6). На диаграмме TAS фигуративные точки составов интрузивных пород попадают в поле магматических образований нормальной щелочности (рис. 5а). По соотношениям  $K_2O$  и  $SiO_2$  они относятся к умеренно-калиевой серии. Содержание  $TiO_2$  невысокое, особенно в диоритах. На диаграмме А. Миширо выделяются разновидности как толеитового, так и известково-щелочного состава (см. рис. 5в). Для оценки возможного влияния гидротермальных изменений на исходный состав пород нами были дополнительно построены диаграммы Zr/Ti–Nb/Y и Zr–Y. Положение точек составов интрузивных пород на первой из них подтверждает их принадлежность к образованиям нормальной щелочности (см. рис. 5б). На диаграмме Zr–Y габбро-диориты и диориты располагаются в области переходной и известково-щелочной петрохимических серий. При оценке серийной принадлежности предпочтение нами отдается соотношениям высокозарядных элементов, так как они менее мобильны при вторичных изменениях (Pearce, 2014).

По сравнению с N-MORB интрузивные породы рудопроявления имеют более низкие содержания высокозарядных и редкоземельных элементов (см. табл. 6). Они характеризуются низкими концентрациями Rb (4.8–19.3 г/т), умеренными – Sr (81.8–459.5), Ba (35.9–336.0), Zr (17.8–37.4) и металлов группы Fe ( $V = 193.1–278.2$  г/т,  $Cr = 21.6–44.7$ ,

**Таблица 3.** Представительные химические анализы (мас. %) роговой обманки и ее кристаллохимические характеристики  
**Table 3.** Representative chemical analyzes (wt %) of hornblende and its crystal chemical characteristics

Компонент/спектр	57	82	56	68	67	22	119	50	15
SiO <sub>2</sub>	46.87	48.51	46.57	47.58	47.45	47.34	47.60	47.64	48.26
TiO <sub>2</sub>	1.00	0.93	0.94	0.95	0.97	0.89	0.92	0.81	0.72
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.79	6.45	6.38	6.77	6.86	6.60	6.53	5.82	6.36
FeO	17.21	17.43	17.13	17.47	17.46	17.66	17.81	16.48	18.35
MnO	0.40	0.40	0.32	0.35	0.36	0.38	0.43	0.39	0.50
MgO	12.64	13.07	12.47	13.04	13.09	12.68	12.45	13.04	12.66
CaO	10.90	11.03	10.87	11.14	11.10	10.93	11.02	10.62	10.86
Na <sub>2</sub> O	1.20	1.23	1.18	1.28	1.23	1.20	1.10	1.06	1.07
K <sub>2</sub> O	0.21	0.17	0.18	0.21	0.18	0.21	0.20	0.17	0.17
Сумма	97.22	99.22	96.04	98.79	98.70	97.89	98.30	96.03	98.95
Si	7.003	7.093	7.052	6.956	6.994	7.045	7.068	7.169	7.107
Ti	0.114	0.105	0.106	0.104	0.105	0.096	0.105	0.095	0.079
Al <sup>IV</sup>	0.997	0.907	0.948	1.044	1.006	0.955	0.932	0.831	0.893
Al <sup>VI</sup>	0.208	0.20	0.188	0.118	0.183	0.20	0.208	0.193	0.21
Fe <sup>3+</sup>	1.193	1.172	1.126	1.196	1.272	1.24	1.169	1.254	1.355
Fe <sup>2+</sup>	0.955	0.955	1.041	0.938	0.979	0.972	1.041	0.913	0.903
Mn	0.052	0.053	0.044	0.043	0.044	0.044	0.053	0.052	0.061
Mg	2.812	2.848	2.815	2.836	2.876	2.809	2.753	2.925	2.774
Ca	1.746	1.731	1.765	1.743	1.757	1.742	1.754	1.71	1.715
Na	0.349	0.352	0.35	0.364	0.35	0.35	0.316	0.312	0.298
K	0.052	0.018	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
Mg/(Mg + Fe <sup>2+</sup> )	0.75	0.75	0.73	0.75	0.75	0.74	0.73	0.76	0.75
T, °C (Féménias et al., 2006)	673	659	659	657	660	644	659	643	614
T, °C (Putirka, 2016)	751	739	743	759	745	729	727	714	720

Примечание. Формульные коэффициенты рассчитаны на 23 O. Количество Fe<sup>3+</sup> и Fe<sup>2+</sup> определено по балансу зарядов.  
 Note. Formula coefficients are calculated at 23 O. The amount of Fe<sup>3+</sup> and Fe<sup>2+</sup> is determined by the balance of charges.



**Рис. 4.** Классификационная диаграмма Mg/(Mg + Fe<sup>2+</sup>)–Si (Leake, 1978) для амфибола.

**Fig. 4.** Classification diagrams Mg/(Mg + Fe<sup>2+</sup>)–Si (Leake, 1978) for amphibole.

**Таблица 4.** Химический состав (мас. %) циркона**Table 4.** Chemical composition (wt %) of zircon

Компонент/образец	302/83		333/165	
	Спектр 209ц	Спектр 218к	Спектр 16ц	Спектр 117к
SiO <sub>2</sub>	31.59	32.60	31.9	32.16
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.27	0.83	–	–
FeO	1.02	0.92	–	–
CaO	0.39	0.15	–	–
ZrO <sub>2</sub>	63.71	64.21	65.85	66.96
HfO <sub>2</sub>	0.92	0.76	1.21	0.92
ThO <sub>2</sub>	1.45	–	1.05	–
UO <sub>2</sub>	0.95	0.20	0.89	–
Сумма	100.3	99.67	100.90	100.40
Zr, г/г*	29.24	–	35.45	–
Hf, г/г*	0.65	–	1.01	–
T, °C (Аранович и др., 2020)	1026	–	1008	–

\*Содержание Zr и Hf в породе.

Примечание. Индексы “ц”, “к” у номеров спектров означают центральные и краевые зоны кристаллов соответственно.

\*Content of Zr and Hf in the rock.

Note. The indices “ц”, “к” in the spectra numbers indicate the central and edge zones of the crystals, respectively.

**Таблица 5.** Представительные составы (мас. %) акцессорных минералов**Table 5.** Representative compositions (wt %) of accessory minerals

Компонент/ спектр	Магнетит		Титанит		Апатит		Титаномагнетит	
	Сп. 182	Сп. 183	Сп. 13	Сп. 17	Сп. 169	Сп. 173	Сп. 125	Сп. 127
SiO <sub>2</sub>	0.39	0.36	29.35	31.67	0.51	0.87	0.30	0.41
TiO <sub>2</sub>	1.09	0.61	26.53	35.13	–	–	5.56	7.12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.21	0.21	5.65	2.93	–	–	1.57	0.94
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.20	1.28	2.84	0.46	–	–	1.14	1.19
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	–	–	–	–	–	–	0.82	0.78
FeO	87.99	88.03	4.14	2.28	0.43	0.21	83.57	83.91
MnO	–	–	–	–	–	–	0.47	0.34
MgO	–	–	1.24	0.38	–	–	–	–
CaO	–	–	24.44	27.11	53.33	53.24	0.30	0.40
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	–	–	–	–	40.87	41.02	–	–
Сумма	90.08	90.49	94.19	99.96	95.13	95.65	94.73	95.09

Ni = 16.0–37.3 г/т), повышенными – Cu (до 109.2 г/т). Тренды распределения редких элементов демонстрируют на спайдерграммах обогащение крупноионными литофильными элементами (K, Rb, Cs, Ba), U, Th и Pb относительно высокозарядных и редкоземельных элементов (рис. 6а).

Спектры распределения РЗЭ обогащены легкими лантаноидами (см. рис. 6б). Значения (La/Yb)<sub>N</sub> составляют 3.90–4.49. Дифференциация внутри тяжелых лантаноидов отсутствует ((Gd/Yb)<sub>N</sub> = 1.03–1.28). Значения отношений Sm/Yb находятся в пределах 1.48–1.96. Аномалии Eu на графиках РЗЭ не выра-

жены (Eu/Eu\* = 0.94–1.05). Аномалии Eu рассчитывались по формуле  $Eu/Eu^* = Eu_N / \sqrt{(Sm_N \times Gd_N)}$ .

### Условия кристаллизации

Для реконструкции *P-T* параметров образования габбро-диоритов и диоритов Кутуевского рудопроявления было использовано несколько независимых минеральных геотермометров и геобарометров.

Оценка ликвидусных температур расплавов родоначальных для интрузивных пород выполнена

**Таблица 6.** Содержание петрогенных (мас. %) и редких (г/т) элементов в габбро-диоритах и диоритах

**Table 6.** Contents of major (wt %) and trace (ppm) elements in gabbro-diorites and diorites

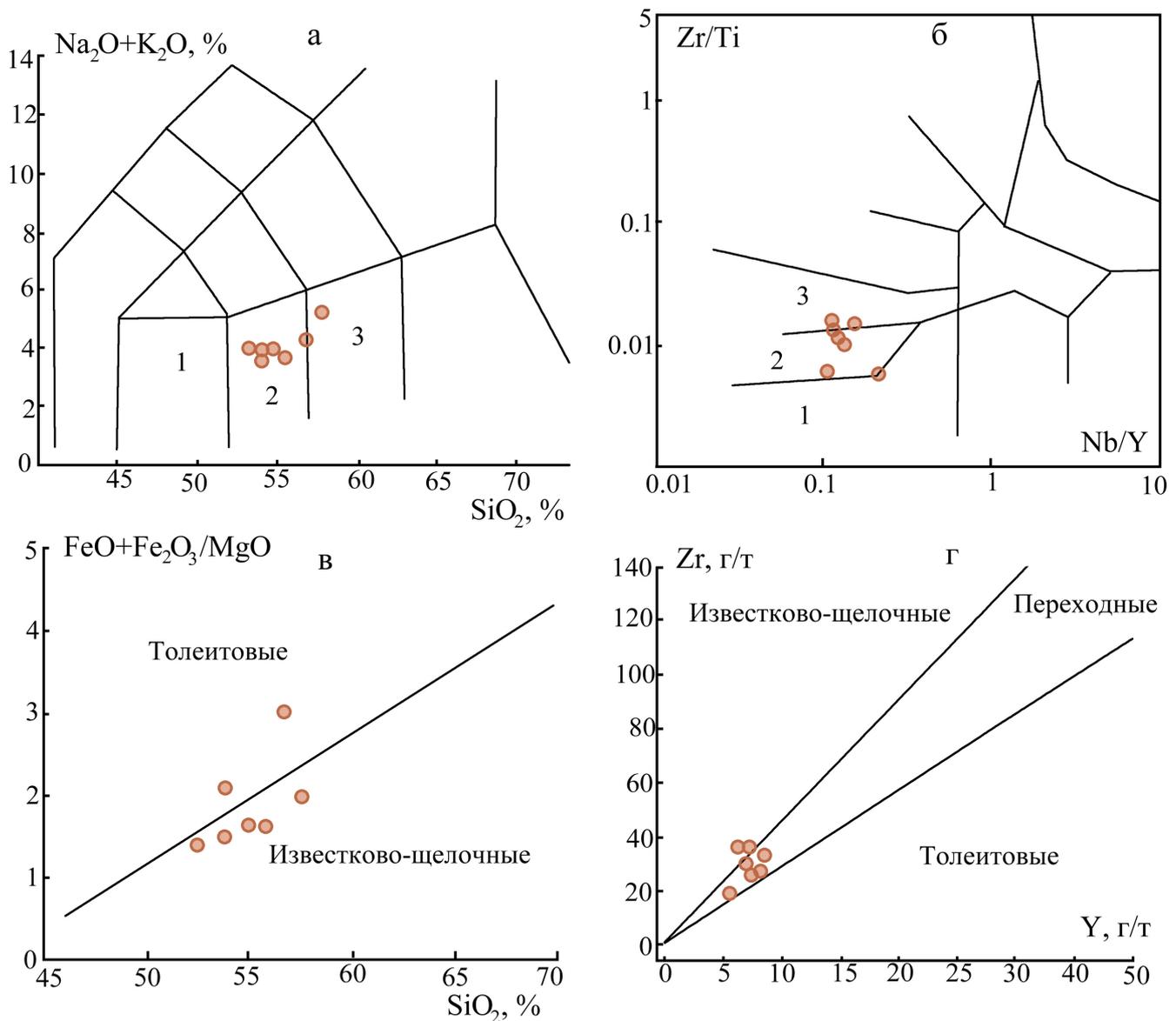
№ обр.	302/83*	302/86*	333/165*	333/76**	375/36*	302/68*	375/64*
SiO <sub>2</sub>	53.20	54.00	54.00	54.82	56.20	57.00	57.80
TiO <sub>2</sub>	0.62	1.02	0.96	0.44	0.27	0.30	0.29
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.60	17.00	17.0	16.90	16.70	16.40	16.80
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.31	4.00	3.80	3.72	4.40	3.75	2.52
FeO	5.47	5.25	4.16	4.41	3.60	5.00	4.93
MnO	0.14	0.13	0.14	0.09	0.07	0.11	0.06
CaO	8.11	5.60	7.38	6.93	5.26	7.10	6.40
MgO	6.00	4.60	5.00	5.30	5.00	3.00	3.70
Na <sub>2</sub> O	2.86	2.70	2.68	2.71	2.70	2.86	4.10
K <sub>2</sub> O	1.09	1.00	1.00	1.10	0.90	1.25	0.91
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.14	0.21	0.14	0.14	0.14	0.12	0.08
П.п.п.	2.43	4.22	3.84	3.36	4.48	2.90	2.12
Сумма	99.97	99.73	100.1	99.92	99.72	99.79	99.71
V	278.24	264.73	275.81	281.40	193.09	278.12	264.20
Cr	44.72	35.29	44.02	37.35	21.56	42.13	37.43
Co	21.25	19.45	26.28	23.17	12.99	22.97	18.83
Ni	24.87	20.88	37.31	24.31	16.02	21.39	20.51
Cu	51.60	83.96	109.21	63.20	37.09	54.96	47.21
Zn	43.20	49.72	40.94	54.17	60.89	57.34	58.61
Rb	11.09	9.12	4.75		6.74	19.34	18.24
Sr	377.62	459.49	81.76	402.31	272.48	446.83	331.90
Y	7.46	6.50	7.23	7.01	5.83	8.32	7.24
Zr	35.47	37.39	29.24	36.12	17.81	26.45	25.93
Nb	1.01	0.90	1.67	0.92	0.76	1.21	0.91
Mo	0.34	0.18	0.27		0.28	0.58	0.42
Ag	0.12	0.08	0.15		0.60	0.25	0.43
Sn	0.39	0.48	0.76		0.47	0.49	0.48
Sb	0.18	0.14	0.85		0.27	0.72	0.55
Cs	0.74	0.37	0.21		0.15	0.92	0.87
Ba	231.07	227.75	35.93	176.98	123.57	335.99	322.14
La	5.40	5.57	6.91	5.63	5.17	5.09	5.82
Ce	12.01	12.27	14.34		11.17	10.68	12.14
Pr	1.58	1.62	1.84		1.46	1.38	1.43
Nd	6.67	6.73	7.56		6.09	5.98	6.12
Sm	1.78	1.44	1.76		1.30	1.37	1.46
Eu	0.44	0.45	0.53		0.41	0.39	0.43
Gd	1.20	1.20	1.50		1.17	1.15	1.27
Tb	0.18	0.18	0.23		0.17	0.18	0.18
Dy	1.19	1.22	1.44		1.12	1.17	1.19
Ho	0.24	0.27	0.32		0.25	0.26	0.26
Er	0.87	0.89	1.01		0.8	0.8	0.84
Tm	0.14	0.13	0.14		0.12	0.13	0.13
Yb	0.91	0.97	0.97	0.91	0.80	0.87	0.88
Lu	0.15	0.15	0.15		0.13	0.13	0.14
Hf	1.01	0.65	0.65		0.61	0.65	0.64
Ta	0.09	0.04	0.11		0.05	0.04	0.05
W	0.37	0.18	0.19		0.31	0.36	0.32
Tl	0.07	0.04	0.02		0.04	0.08	0.06
Pb	3.76	2.37	3.15		1.49	2.72	2.14
Bi	0.02	0.02	0.03		0.06	0.01	0.02
Th	0.89	1.31	2.36		1.21	1.10	1.30
U	0.50	0.32	1.05		0.42	0.37	0.39

\*Редкие элементы определены методом ICP-MS.

\*\*Редкие элементы определены методом ICP-AES.

\*Rare elements were determined by the ICP-MS method.

\*\*Rare elements were determined by the ICP-AES method.



**Рис. 5.** Диаграммы  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})\text{-SiO}_2$  (Middlemost, 1994) (а),  $\text{Zr}/\text{Ti}\text{-Nb}/\text{Y}$  (Winchester, Floyd, 1976) (б),  $(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)/\text{MgO}\text{-SiO}_2$  (Miyashiro, 1973) (в),  $\text{Zr}\text{-Y}$  (MacLean, Barrett, 1993) (г) для габбро-диоритов и диоритов.

а: 1 – габбро, 2 – габбро-диориты, 3 – диориты.

б: 1 – субщелочные базальты, 2 – базальты и андезиты, 3 – андезиты.

**Fig. 5.** Diagrams  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})\text{-SiO}_2$  (Middlemost, 1994) (а),  $\text{Zr}/\text{Ti}\text{-Nb}/\text{Y}$  (Winchester, Floyd, 1976) (б),  $(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)/\text{MgO}\text{-SiO}_2$  (Miyashiro, 1973) (в),  $\text{Zr}\text{-Y}$  (MacLean, Barrett, 1993) (г) for gabbro-diorites and diorites.

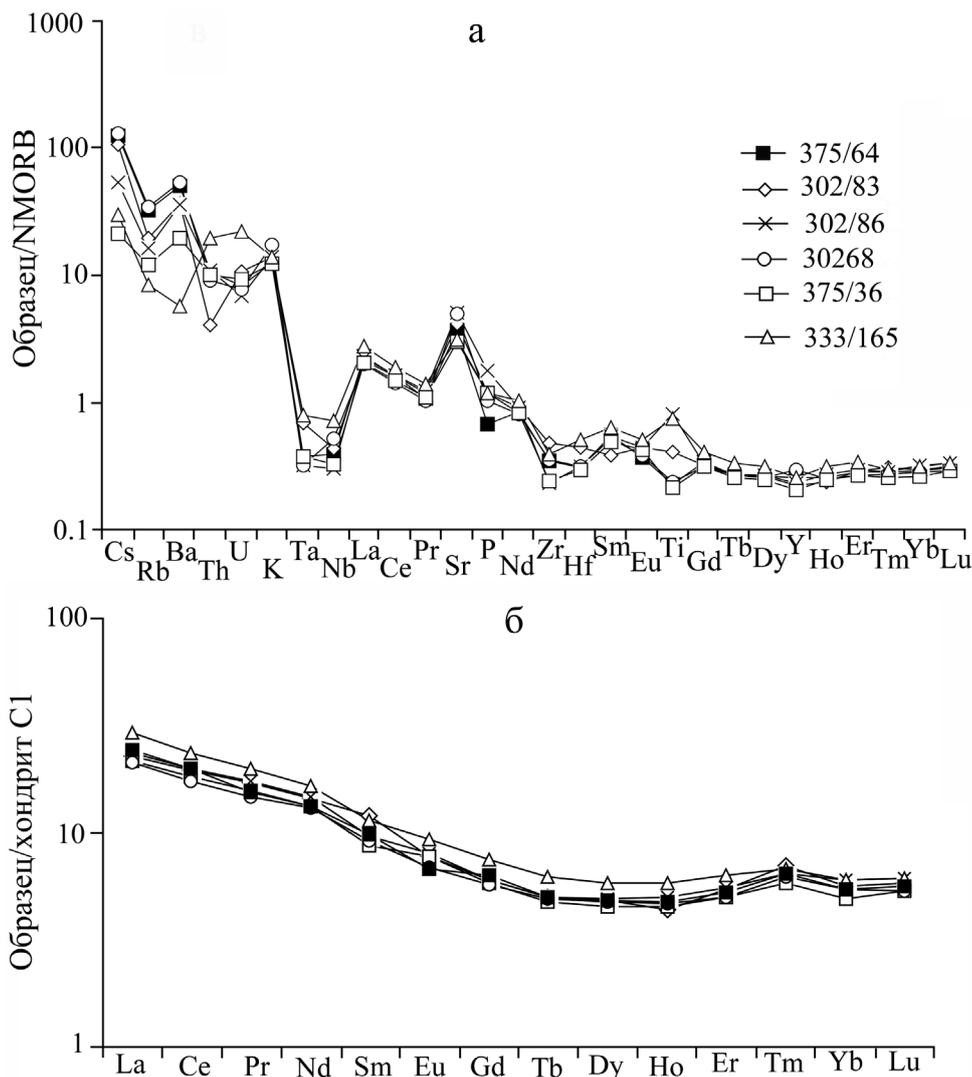
а: 1 – gabbro, 2 – gabbro-diorites, 3 – diorites.

б: 1 – subalkaline basalts, 2 – andesite basalts, 3 – andesites.

по геотермометру, основанному на равновесии клинопироксен–расплав (Putirka, 2008). При равновесной кристаллизации клинопироксена из расплава  $\text{K}_D\text{Fe}/\text{Mg}$  должно быть близко к  $0.27 \pm 0.03$ . Все изученные моноклинные пироксены рудопроявления удовлетворяют условию равновесия клинопироксен–расплав (см. табл. 2). Рассчитанные

значения температуры составили  $1010\text{--}1072^\circ\text{C}$  (см. табл. 2).

Давление, при котором происходила кристаллизация клинопироксена, было оценено с помощью клинопироксенового геотермобарометра, калиброванного Х. Вангом с соавторами (Wang et al., 2021) для магматических пород основного и сред-



**Рис. 6.** Тренды распределения редких (а) и редкоземельных (б) элементов в габбро-диоритах и диоритах. Нормирование на N-MORB и C1 (McDonough, Sun, 1995).

**Fig. 6.** Trends in the distribution of rare (a) and rare earth (б) elements in gabbro-diorites and diorites. Standardization for N-MORB and C1 (McDonough, Sun, 1995).

него состава. Полученные значения составили 1.35–1.78 кбар (см. табл. 2). Отсутствие достоверных данных по содержанию воды в момент кристаллизации клинопироксена не позволило использовать этот геотермобарометр для определения температуры расплава.

Нами была сделана попытка оценить давление на ранней стадии кристаллизации с помощью нескольких модификаций геобарометра, основанных на равновесии клинопироксен–расплав (Putirka et al., 2003; Neave, Putirka, 2017; и др.). Вычисленные с их помощью значения давления дают существенный разброс, и поэтому нами не учитывались. Например, расчет по анализу 302/83-161 (см. табл. 2)

показал значение давления по (Neave, Putirka, 2017) 1.2 кбар, тогда как по (Putirka et al., 2003) – 3.5 кбар.

Для определения температуры кристаллизации габбро-диоритов и диоритов нами привлечены также данные по Zr-Hf-термометру для циркона. Этот термометр, разработанный Л.Я. Арановичем с соавторами (2020), основан на распределении Zr и Hf между цирконом и расплавом. Расчет температуры выполнен для центральных зон двух рассмотренных кристаллов циркона. Значения температуры составили 1008 и 1026°C (см. табл. 4).

Кроме того, были оценены температурные условия кристаллизации роговой обманки. По данным Ti-геотермометра (Féménias et al., 2006), осно-

ванного на эмпирически и экспериментально установленной зависимости содержания Ti в амфиболе от температуры, кристаллизация роговой обманки происходила в интервале температур 614–678°C (см. табл. 3). Геотермометр, калиброванный по содержанию в амфиболе Si, Ti, Fe и Na (Putirka, 2016), показал более высокие значения температуры (714–759°C). Совпадение оценок температуры по этим геотермометрам удовлетворительное. Расхождение значений не превышает 9–15 отн. %.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как видно из приведенных данных, габбро-диориты и диориты состоят из альбитизированного плагиоклаза, который по первичному составу, по видимому, был близок к андезину, клинопироксену, представленному диопсидом и авгитом, и зеленой роговой обманке, замещающей моноклинный пироксен часто в ассоциации с кварцем.

Расчеты с помощью геотермометра клинопироксен–расплав (Putirka, 2008) и клинопироксенового геобарометра (Wang et al., 2021) показали, что клинопироксен кристаллизовался при  $T = 1010–1072^\circ\text{C}$  и  $P = 1.35–1.78$  кбар.

Бликие значения температуры были получены с использованием Zr-Hf-геотермометра (Аранович и др., 2020) для центральных зон двух кристаллов акцессорного циркона (1008 и 1026°C). Изменение состава циркона в краевых частях изучаемых кристаллов, скорее всего, связано с постмагматическими гидротермальными процессами.

Генезис роговой обманки не установлен и требует дальнейшего изучения. Возможный диапазон температур ее кристаллизации составляет 614–714°C.

В результате можно констатировать, что кристаллизация плагиоклаза и клинопироксена габбро-диоритов происходила в диапазоне температур 1000–1100°C при давлении 1.4–1.8 кбар. Такие параметры близки ликвидусу андезибазальта, содержащего около 2.5–4.5% H<sub>2</sub>O (Moore, Sam-michael, 1998). Кристаллизация амфибола в таком расплаве становится возможной только при достижении им водного солидуса и/или в субсолидусных условиях, что подтверждается данными амфиболовой термометрии.

Габбро-диориты и диориты Кутуевского рудопроявления имеют надсубдукционные геохимические характеристики. Тренды распределения в них редких элементов демонстрируют на спайдерграммах обогащение крупноионными литофильными элементами (K, Rb, Cs, Ba), U, Th и Pb относительно высокозарядных и редкоземельных элементов, а также наличие отрицательных аномалий Nb, Zr и положительных аномалий Sr, что отличает надсубдукционные магматиты (см. рис. 6а). Принадлежность интрузивных пород рудопроявления к

островодужным образованиям подтверждают отрицательные аномалии Ti, проявленные на большинстве спектров. В то же время на некоторых из них аномалии Ti имеют положительный знак, что нехарактерно для надсубдукционных пород.

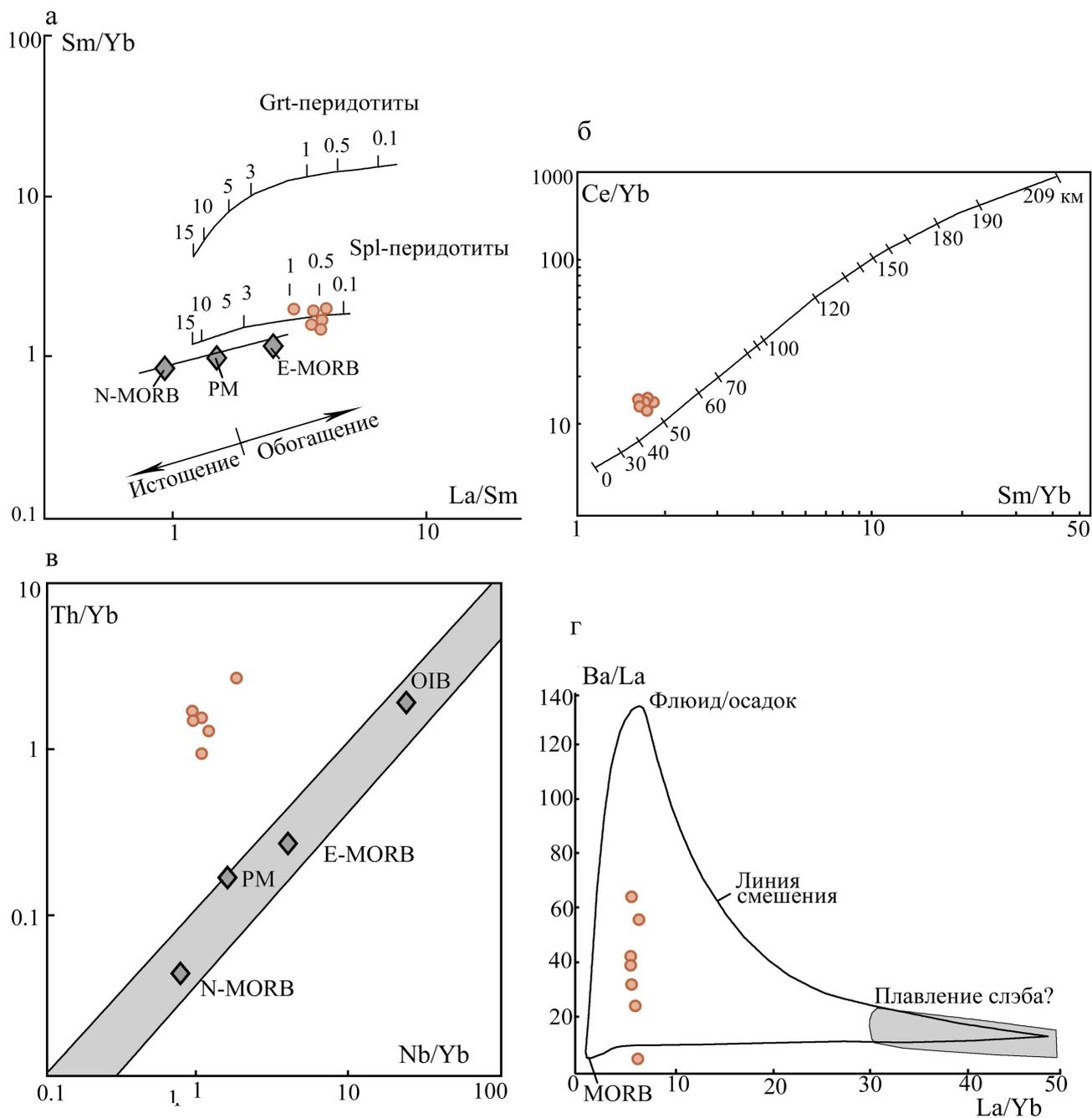
Основными источниками, определяющими состав субдукционных магм, как известно, являются перидотиты мантийного клина и субдукционный компонент, в составе которого в различных пропорциях могут присутствовать водные флюиды, возникшие при дегидратации пород слэба, и расплавы, образовавшиеся при плавлении осадков и базальтов субдуцирующей океанической плиты. Дополнительное “влияние” оказывают гетерогенность мантии, процессы коровой контаминации и другие факторы.

Согласно диаграмме Sm/Yb–La/Sm, представленной на рис. 7а, расплавы для интрузивных пород рудопроявления могли образоваться из шпинелевого перидотита. Гранат в мантийном источнике отсутствовал либо его роль была незначительной, на что указывает также слабофракционный спектр распределения PЗЭ в области тяжелых лантаноидов ( $Gd_N/Yb_N = 1.03–1.28$ ).

Отсутствие в источнике граната дает основание предполагать относительно небольшую глубину магмагенерации. Согласно данным С.М. Кай и Ц. Мподоциса (Кай, Мподоцис, 2001), гранат устойчив на глубинах более 45–50 км, а по расчетам Р.М. Эллама (Ellam, 1992) – свыше 60 км. Глубину области магмагенерации приблизительно можно оценить по значениям отношений Ce/Yb и Sm/Yb (Ellam, 1992; Wu et al., 2018). На диаграмме Ce/Yb–Sm/Yb (см. рис. 7б) точки этих отношений в интрузивных породах Кутуевского рудопроявления попадают в интервал глубин примерно 45–50 км. Скорее всего, мантийным источником для магм служили перидотиты надсубдукционной литосферной мантии.

Состав и степень обогащения мантийного источника до его контаминации субдукционной компонентой позволяют охарактеризовать отношения некогерентных элементов, консервативных во флюидной фазе, с высоким валовым коэффициентом распределения (больше 1): Nb/Yb, Th/Yb и др. (Di Vincenzo, Rochi, 1999; Pearce, 2008; и др.). Вариации значений Nb/Yb в габбро-диоритах и диоритах рудопроявления, составляющие 0.93–1.72 (см. рис. 7в), указывают на то, что плавлению подвергался мантийный субстрат, близкий примитивной или слабо деплептированной мантии (McDonough, Sun, 1995). Повышенные значения Th/Yb (0.98–2.43) в породах рудопроявления по сравнению с величинами в мантийных источниках отражают вклад в их формирование субдукционной и/или коровой компоненты (см. рис. 7б).

Для определения вклада флюидов и расплавов в метасоматоз мантийного субстрата обычно ис-



**Рис. 7.** Диаграммы Sm/Yb–La/Sm (Школьник и др., 2009) (а); корреляции между значениями Ce/Yb и Sm/Yb в магматических породах, имеющих мантийный источник, и мощностью литосферы (Wu et al., 2018) (б); Th/Yb–Nb/Yb (Pearce, 2008) (в); Ba/La–La/Yb (Castillo et al., 1999) (г) для габбро-диоритов и диоритов.

**Fig. 7.** Diagrams Sm/Yb–La/Sm (Shkolnik et al., 2009) (a); the correlations between Ce/Yb and Sm/Yb values in igneous rocks with mantle source and the thickness of the lithosphere (Wu et al., 2018) (б); Th/Yb–Nb/Yb (Pearce, 2008) (в); Ba/La–La/Yb (Castillo et al., 1999) (г) for gabbro-diorites and diorites.

пользуются отношения некогерентных элементов, имеющих разную подвижность во флюидной фазе. Информативными являются парные отношения Ba/La и La/Yb (Castillo et al., 1999), поскольку Ba является элементом, мобильным в водном флюиде, а La и Yb относятся к слабо мобильным элементам.

На диаграмме Ba/La–La/Yb составы габбро-диоритов и диоритов Кутуевского рудопоявления располагаются параллельно линии смешения MORB – флюид/осадок (см. рис. 7г), что свидетельствует о существенном вкладе в магмагенезис элементов, мобильных во флюидной фазе (Castillo et

**Таблица 7.** Петро-геохимическая характеристика интрузивных пород порфировых месторождений и рудопроявлений зоны ГУР на Южном Урале**Table 7.** Petro-geochemical characteristics of intrusive rocks of porphyry deposits and ore occurrences of the MUF zone in the Southern Urals

Петро-геохимические характеристики	Месторождения и рудопроявления				
	Кутуевское Au-Cu- порфировое	Вознесенское Cu-порфировое		Au-порфировое Большой Каран	Карагайкульское Au-порфировое
Состав продуктивных интрузий	GaDr, Dr	Dr	GrDr, PlGr	GaDr, Dr, GrDr	Ga, GaDr, Dr
Петрохимическая серия	П-И	И	А	П-И	П-И
Rb, г/т	4.8–19.3	27.0	8.0–18.0	25.0–46.0	13.5–53.5
Sr, г/т	82–459	228–425	82–234	143–343	219–400
Y, г/т	5.8–8.3	8.9–10.8	2.0–4.3	6.4–13.2	6.6–14.0
Nb, г/т	0.76–1.67	1.70–1.80	1.00–2.00	1.30–2.10	1.30–4.00
∑РЗЭ, г/т	29.58–38.70	18.98–21.04	15.40–26.92	19.45–38.09	25.81–47.10
Nb/Yb	0.93–1.72	1.50–1.93	3.00–4.00	0.93–2.28	1.14–2.50
La/Sm	3.03–3.99	2.21–2.30	6.05–7.56	1.76–5.31	3.07–4.54
Sm/Yb	1.48–1.97	1.04–1.13	1.18–1.92	1.27–1.39	1.09–1.64
La <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub>	4.12–511.00	1.16–1.27	5.12–10.47	1.59–6.08	2.35–4.78
Gd <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub>	1.03–1.28	0.98–1.05	0.83–1.23	0.93–1.15	1.03–1.28

Примечание. Сокращенные названия пород: Ga – габбро, GaGr – габбро-диориты, Dr – диориты, GrDr – гранодиориты, PlGr – плагиограниты. Петрохимические серии: П – переходная, И – известково-щелочная, А – адакитоподобные гранитоиды. Литературные источники: Вознесенское и Большекаранское месторождения – (Знаменский, 2021), Карагайкульское рудопроявление – (Знаменский и др., 2022).

Note. Abbreviated names of rocks: Ga – gabbro, GaGr – gabbro-diorites, Dr – diorites, GrDr – granodiorites, PlGr – plagiogranites. Petrochemical series: П – transitional, И – calc-alkaline, А – adakite-like granitoids. Literary sources: Voznesenskoye and Bolshekaranskoye deposits – (Znamensky, 2021), Karagaykul ore occurrence – (Znamensky et al., 2022).

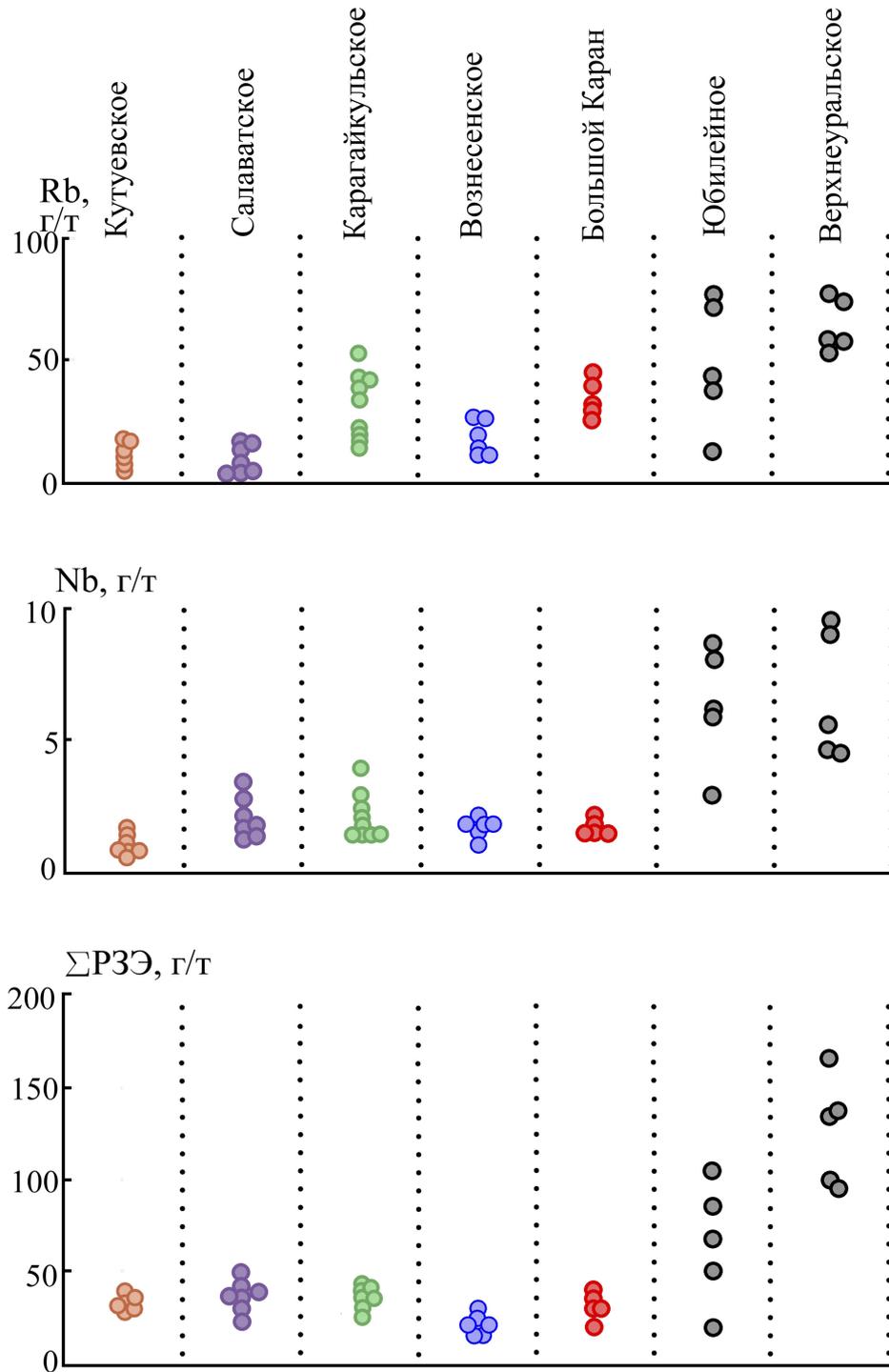
al., 1999). Повышенные содержания Cu в габбро-диоритах и диоритах, достигающие 109.2 г/т, скорее всего, связаны с метасоматозом перидотитов флюидами, которые экстрагировали этот металл из субдуцирующей океанической плиты. По оценкам В.М. Уайта и Э.М. Клайн (White, Klein, 2014), концентрации Cu в базальтах океанической коры существенно выше (~80 г/т), чем в мантии (~20 г/т).

Повышенные значения La/Nb (4.1–6.8) в габбро-диоритах и диоритах могут указывать на участие в магмагенезисе процессов коровой контаминации.

Нами проведен сравнительный анализ петролого-геохимических характеристик интрузивных пород Кутуевского рудопроявления и других порфировых месторождений и рудопроявлений Магнитогоской мегазоны. По геодинамическим условиям формирования и возрасту порфировые месторождения мегазоны могут быть разделены на две основные группы: 1) образовавшиеся в островодужной обстановке (D<sub>1-2</sub>?); 2) сформировавшиеся в условиях аккреции и коллизии девонской островной дуги с краем Восточно-Европейской платформы (D<sub>3</sub>-C<sub>1</sub>) (Грабежев, 2014; Грабежев и др., 2017; Plotinskaya et al., 2017; Плотинская, 2023).

К первой группе относятся порфировые проявления зоны ГУР (Вознесенское, Салаватское, Большой Каран и др.). Вторая группа представлена Au-порфировым Юбилейным месторождением и Cu-Mo-порфировым Верхнеуральским рудопроявлением.

По геологической позиции, петрографическим и геохимическим особенностям состава интрузивных пород Кутуевское рудопроявление сопоставимо с месторождениями первой группы. Общим для них является преобладание в составе продуктивных комплексов габбро-диоритов и диоритов. Интрузивные породы представляют собой умеренно-калиевые образования, имеющие нормальную щелочность, известково-щелочной или переходный толеитовый-известково-щелочной состав (Грабежев, Белгородский, 1992; Знаменский, 2021; Знаменский и др., 2022; Плотинская, 2023). Они обладают низкими содержаниями Rb, Nb, Y, Yb и РЗЭ (табл. 7). Продуктивные гранитоиды Магнитогоской мегазоны, образовавшиеся в условиях аккреции и коллизии дуга-континет, обладают заметно более высокими концентрациями этих элементов (рис. 8).



**Рис. 8.** Содержание Rb, Nb и  $\Sigma$ РЗЭ в интрузивных породах порфировых месторождений и рудопроявлений Магнитогорской мегазоны.

Литературные источники: Салаватское, Юбилейное месторождения и Верхнеуральское рудопроявление – (Plotinskaya et al., 2017), остальные месторождения и рудопроявления см. в табл. 7.

**Fig. 8.** Contents of Rb, Nb and  $\Sigma$ REE in intrusive rocks of porphyry deposits and ore occurrences of the Magnitogorsk megazone.

Literary sources: Salavatskoye, Yubileinoe deposits and Verkhneuralskoye ore occurrence – (Plotinskaya et al., 2017), for other deposits and ore occurrences, see Table 7.

Спектры распределения РЗЭ в рудоносных интрузиях порфировых проявлений зоны ГУР характеризуются невысокой степенью обогащения легкими лантаноидами. Значения  $La_N/Yb_N$  варьируют в интервале от 1.16 до 6.08. Исключение составляют адакитоподобные гранитоиды, слагающие часть рудоносных даек Вознесенского месторождения ( $La_N/Yb_N = 5.12-10.41$ ). В основном они обладают петролого-геохимическими характеристиками магматитов, формирующихся на начальных стадиях развития энсиматических островных дуг (Богатиков, Цветков, 1988; Косарев и др., 2005; и др.). Для сравнения значения  $La_N/Yb_N$  в гранитоидах Юбилейного месторождения составляют 9.2–11.7, а Верхнеуральского рудопроявления – 9.1–26.2 (Плотинская, 2023).

Актуальной задачей остается определение изотопного возраста интрузий и руд порфировых проявлений зоны ГУР. Изотопные датировки имеются только для Вознесенского месторождения и Карагайкульского рудопроявления. Они отвечают раннему девону. U-Pb возраст диоритов, слагающих Вознесенский массив, составляет  $412 \pm 3$  млн лет (Грабежев и др., 2017). Для молибденита порфировых руд, связанных в этом массиве с дайками гранитоидов, О.Ю. Плотинской (2023) Re-Os методом получены две упомянутые датировки:  $396 \pm 6$  и  $394 \pm 6$  млн лет. Возраст цирконов отличается от возраста молибденита, что требует проведения дополнительных исследований. Для диоритов Карагайкульского рудопроявления получена Sm-Nd изохрона с возрастом  $418 \pm 25$  млн лет (Kosarev et al., 2014).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Породообразующими минералами габбро-диоритов и диоритов, слагающих рудоносные интрузии Кутуевского рудопроявления, являются плагиоклаз состава андезин или выше, клинопироксен, представленный авгитом и диопсидом. Клинопироксен в значительной степени замещен зеленой роговой обманкой, генетическая природа которой не ясна. К аксессуарным минералам относятся апатит, циркон, титанит, магнетит, титаномагнетит.

Кристаллизация пород происходила при  $T = 1000-1100^\circ\text{C}$  и  $P = 1.35-1.78$  кбар, что отвечает водному ликвидусу базальта при содержании в среднем 3%  $H_2O$ , т. е. безамфиболовой области кристаллизации плагиоклаза с пироксеном.

Габбро-диориты и диориты представляют собой надсубдукционные образования, имеющие нормальную щелочность, переходный и известково-щелочной состав. Наиболее вероятным мантийным источником магм для них являлись шпинелевые перидотиты литосферной мантии, предварительно метасоматизированные водными флюидами, возникшими при дегидратации пород слэба.

В формировании габбро-диоритов и диоритов, по-видимому, участвовали также процессы коровой контаминации. Интрузивные породы Кутуевского рудопроявления и других порфировых проявлений зоны ГУР на Южном Урале имеет близкие петрогеохимические характеристики, которые соответствуют магматическим образованиям ранних стадий развития энсиматических островных дуг.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреев А.В., Гирфанов М.М., Куликов Д.А., Мигачев И.Ф., Минина О.В., Авилова О.В., Красносельских А.А., Старостин И.А., Черемисин А.А. (2018) Рудные районы с медно-порфировым оруденением – перспективная минерально-сырьевая база меди Южного Урала. *Отч. геология*, (4), 3-17.
- Аранович Л.Я., Бортников Н.С., Борисов А.А. (2020) Океанический циркон как петрогенетический индикатор. *Геология и геофизика*, **61**(5-6), 685-700.
- Богатиков О.А., Цветков А.А. (1988) Магматическая эволюция островных дуг. М.: Наука, 248 с.
- Грабежев А.И. (2014) Юбилейное Cu-Au-порфировое месторождение (Южный Урал, Россия): SHRIMP-II U-Pb-возраст циркона и изотопно-геохимические особенности рудоносных гранитоидов. *Докл. РАН*, **454**(3), 315-318.
- Грабежев А.И., Белгородский Е.А. (1992) Продуктивные гранитоиды и метасоматиты медно-порфировых месторождений. Екатеринбург: Наука, 199 с.
- Грабежев А.И., Шардакова Г.Ю., Ронкин Ю.Л., Азовскова О.Б. (2017) Систематика U-Pb возрастов цирконов из гранитоидов медно-порфировых месторождений Урала. *Литосфера*, **17**(5), 113-126. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2017-17-5-113-126>
- Знаменский С.Е. (2021) Петролого-геохимические характеристики пород Вознесенского интрузивного массива (Южный Урал): к вопросу о составе и источниках магм, продуцирующих золото- и медно-порфировое оруденение. *Литосфера*, **21**(3), 365-385. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2021-21-3-365-385>
- Знаменский С.Е., Косарев А.М., Шафигуллина Г.Т. (2019) Фациальный состав, геохимические особенности и геодинамические обстановки образования позднемезских островодужных комплексов зоны Главного Уральского разлома на Южном Урале. *Вестн. Перм. ун-та. Геология*, **18**(1), 1-16.
- Знаменский С.Е., Косарев А.М., Шафигуллина Г.Т. (2022) Карагайкульское золото-порфировое рудопроявление (Южный Урал): геология и петрогенезис интрузивных пород, состав минералов околорудных метасоматитов и руд. *Георесурсы*, **24**(3), 187-196. <https://doi.org/10.18599/grs.2022.3.16>
- Знаменский С.Е., Холоднов В.В. (2018) Петролого-геохимические особенности рудовмещающих эффузивных и интрузивных пород Николаевского месторождения золото-порфирового типа (Южный Урал). *Литосфера*, (4), 607-620. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-4-607-620>
- Косарев А.М., Пучков В.Н., Серавкин И.Б. (2005) Петролого-геохимические особенности раннедевонско-эйфельских островодужных вулканитов Магнитогорской мегазоны в геодинамическом аспекте.

Литосфера, (4), 22-41.

- Кривцов А.И. (1983) Геологические основы прогнозирования и поисков медно-порфировых месторождений. М.: Недра, 256 с.
- Маслов В.А., Артюшкова О.В. (2010) Стратиграфия и корреляция девонских отложений Магнитогорской мегазоны Южного Урала. Уфа: ДизайнПолиграф-Сервис, 288 с.
- Плотинская О.Ю. (2023) Порфирово-эпитептермальные системы Урала: источники вещества, эволюция и зональность. Автореф. дисс. ... д-ра геол.-мин. наук. М.: ИГЕМ РАН, 39 с.
- Серавкин И.Б., Косарев А.М., Салихов Д.Н., Знаменский С.Е., Родичева З.И., Рыкус М.В., Сначев В.И. (1992) Вулканизм Южного Урала М.: Наука, 197 с.
- Шишаков В.Б., Сергеева Н.Е., Сурин С.В. (1988) Вознесенское медно-порфировое месторождение на Южном Урале. *Геология руд. месторождений*, (2), 85-90.
- Школьник С.И., Резницкий Л.З., Беличенко В.Г., Бараш И.Г. (2009) Геохимия, вопросы петрогенезиса и геодинамическая позиция метавулканиитов Тункинско-го террейна (Байкало-Хубсугульский регион). *Геология и геофизика*, **50**(9), 1013-1024.
- Castillo P.R., Janney P., Solidum R.U. (1999) Petrology and geochemistry of Camiguin Island, southern Philippines: Insights to the source of adakites and other lavas in a complex arc setting. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **134**(1), 33-51.
- Di Vincenzo G., Rocchi S. (1999) Origin and interaction of mafic and felsic magmas in an evolving late orogenic setting: The Early Paleozoic Terra Nova intrusive complex, Antarctica *Contrib. Mineral. Petrol.*, **137**, 15-35. <https://doi.org/10.1007/s004100050579>
- Ellam R.M. (1992) Lithospheric thickness as a control on basalt geochemistry. *Geology*, **20**(2), 153-156.
- Féménias O., Mercier J., Nkono C., Diot H., Berza T., Tatu M., Demaiffe D. (2006) Calcic amphibole growth and compositions in calc-alkaline magmas: Evidence from the Motru Dike Swarm (Southern Carpathians, Romania). *Amer. Miner.*, **91**, 73-81.
- Kay S.M., Mpodozis C. (2001) Central Andean ore deposits linked to evolving shallow subduction system and thickening crust. *GSA today*, **11**, 4-9.
- Kosarev A.M., Puchkov V.N., Seravkin I.B., Kholodnov V.V., Grabezhtv A.I., Ronkin Y.L. (2014) New data on the age and geodynamic position of copper-porphyry mineralization in the Main Uralian Fault zone (Southern Urals). *Dokl. Earth Sci.*, **495**(1), 1317-1321. <https://doi.org/10.1134/S1028334X1411004X>
- Leake B.E. (1978) Nomenclature of amphiboles. *Amer. Miner.*, **63**, 1023-1052.
- MacLean W.H., Barrett T.J. (1993) Lithochemical techniques using immobile elements. *J. Geochem. Explor.*, **48**, 109-133.
- McDonough W.F., Sun S. (1995) The composition of the Earth. *Chem. Geol.*, **120**, 223-253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4)
- Middlemost E.A.K. (1994) Naming materials in magma/igneous rock system. *Earth Sci. Rev.*, **37**, 215-224. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90029-9)
- Miyashiro A. (1973) The Troodos ophiolitic complex was probably formed in an island arc. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **19**, 218-224. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(73\)90118-0](https://doi.org/10.1016/0012-821x(73)90118-0)
- Moore G., Carmichael I.S.E. (1998) The hydrous phase equilibria (to 3 kbar) of an andesite and basaltic andesite from western Mexico: Constraints on water content and conditions of phenocryst growth. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **130**, 304-319.
- Morimoto N., Fabries J., Ginzburg A.K., Ross M., Seifert M.F.A., Zussman J.K., Aoki J.K., Gottardi G. (1988) Nomenclature of pyroxenes. *Amer. Miner.*, **73**, 1123-1133.
- Neave D., Putirka K.D. (2017) A new clinopyroxene-liquid barometer, and implications for magma storage pressures under Icelandic rift zones. *Amer. Miner.*, **102**, 777-794.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.06.016>
- Pearce J.A. (2014) Immobile Element Fingerprinting of Ophiolites. *Elements*, **10**, 101-108.
- Plotinskaya O.Yu., Grabezhev A.I., Tesselina S., Seltmann R., Groznova E.O., Abramov S.S. (2017) Porphyry deposits of the Urals: Geological framework and metallogeny. *Ore Geol. Rev.*, **85**, 153-173. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.07.002>
- Putirka K.D. (2008) Thermometers and Barometers for Volcanic Systems. *Rev. Mineral. Geochem.*, **69**, 61-120. <https://doi.org/10.2138/rmg.2008.69.3>
- Putirka K.D. (2016) Amphibole thermometers and barometers for igneous systems and some implications for eruption mechanisms of felsic magmas at arc volcanoes. *Amer. Miner.*, **101**, 841-858. <http://doi.org/10.2138/am-2016-5506>
- Putirka K.D., Busby C. (2007) The tectonic significance of high-K<sub>2</sub>O volcanism in the Sierra Nevada, California. *Geology*, **35**(10), 923-926.
- Putirka K.D., Mikaelian H., Ryerson F., Shaw H. (2003) New clinopyroxene-liquid thermobarometers for mafic, evolved, and volatile-bearing lava compositions, with applications to lavas from Tibet and the Snake River Plain, Idaho. *Amer. Miner.*, **88**, 1542-1554. <https://doi.org/10.2138/am-2003-1017>
- Wang X., Hou T., Wang M., Zhang C., Zhang Z., Pan R., Marxer F., Zhang H. (2021) A new clinopyroxene thermometer for mafic to intermediate magmatic systems. *Eur. J. Mineral.*, **33**, 621-637. <https://doi.org/10.5194/ejm-33-621-2021>
- White W.M., Klein E.M. (2014) Composition of the Oceanic Crust. *Treatise on Geochemistry*, Ch. 4.13, 457-496. <http://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00315-6>
- Winchester J.A., Floyd P.A. (1976) Geochemical magma type discrimination: Application to altered and metamorphosed igneous rock. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **28**, 459-469.
- Wu Z., Barosh P., Zhang Q., Wu J., Yang Y. (2018) A thickness Gauge for the lithosphere based on Ce/Yb and Sm/Yb of mantle-derived magmatic rocks. *Acta Geol. Sinica*, **92**(6), 2120-2135.
- Znamensky S.E., Artemyev D.A., Ankusheva N.N. (2022) REE in the Calcite of Au-Cu Porphyry Mineralization at the Kutuevsky Occurrence, South Urals: LA-ICP-MS Data. *Geoschem. Int.*, **60**(9), 830-840.

## REFERENCES

Andreev A.V., Girfanov M.M., Kulikov D.A., Migachev I.F., Minina O.V., Avilova O.V., Krasnoselskikh A.A., Starostin I.A., Cheremisin A.A. (2018) Ore areas with porphyry

- ry copper mineralization – a promising mineral resource base for copper in the Southern Urals. *Otech. Geologiya*, (4), 3-17. (In Russ.)
- Aranovich L.Ya., Bortnikov N.S., Borisov A.A. (2020) Oceanic zircon as a petrogenetic indicator. *Rus. Geol. Geophys.*, **61**(5-6), 559-570 (translated from *Geologiya i Geofizika*, **61**(5-6), 685-700).
- Bogatikov O.A., Tsvetkov A.A. (1988) Magmatic evolution of island arcs. Moscow, Nauka Publ., 248 p. (In Russ.)
- Castillo P.R., Janney P., Solidum R.U. (1999) Petrology and geochemistry of Camiguin Island, southern Philippines: Insights to the source of adakites and other lavas in a complex arc setting. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **134**(1), 33-51.
- Di Vincenzo G., Rocchi S. (1999) Origin and interaction of mafic and felsic magmas in an evolving late orogenic setting: The Early Paleozoic Terra Nova intrusive complex, Antarctica *Contrib. Mineral. Petrol.*, **137**, 15-35. <https://doi.org/10.1007/s004100050579>
- Ellam R.M. (1992) Lithospheric thickness as a control on basalt geochemistry. *Geology*, **20**(2), 153-156.
- Féménias O., Mercier J., Nkono C., Diot H., Berza T., Tatu M., Demaiffe D. (2006) Calcic amphibole growth and compositions in calc-alkaline magmas: Evidence from the Motru Dike Swarm (Southern Carpathians, Romania). *Amer. Miner.*, **91**, 73-81.
- Grabezhev A.I. (2014) Yubileinoe Cu-Au porphyry deposit (Southern Urals, Russia): SHRIMP-II U-Pb zircon age and isotope-geochemical features of ore-bearing granitoids. *Dokl. RAN*, **454**(3), 315-318. (In Russ.)
- Grabezhev A.I., Belgorodsky E.A. (1992) Productive granitoids and metasomatites of porphyry copper deposits. Ekaterinburg, Nauka Publ., 199 p. (In Russ.)
- Grabezhev A.I., Shardakova G.Yu., Ronkin Y.L., Azovskova O.B. (2017) Systematization of U-Pb zircon ages of granitoids from the copper porphyry deposits on the Urals. *Lithosphere (Russia)*, **17**(5), 113-126. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2017-17-5-113-126>
- Kay S.M., Mpodozis C. (2001) Central Andean ore deposits linked to evolving shallow subduction system and thickening crust. *GSA today*, **11**, 4-9.
- Kosarev A.M., Puchkov V.N., Seravkin I.B. (2005) Petrological-geochemical features of the Early Devonian-Eifelian island-arc volcanics of the Magnitogorsk zone in a geodynamic context. *Lithosphere (Russia)*, (4), 22-41. (In Russ.)
- Kosarev A.M., Puchkov V.N., Seravkin I.B., Kholodnov V.V., Grabezhtv A.I., Ronkin Y.L. (2014) New data on the age and geodynamic position of copper- porphyry mineralization in the Main Uralian Fault zone (Southern Urals). *Dokl. Earth Sci.*, **495**(1), 1317-1321. <https://doi.org/10.1134/S1028334X1411004X>
- Krivtsov A.I. (1983) Geological basis for forecasting and searching for porphyry copper deposits. Moscow, Nedra Publ., 256 p. (In Russ.)
- Leake B.E. (1978) Nomenclature of amphiboles. *Amer. Miner.*, **63**, 1023-1052.
- MacLean W.H., Barrett T.J. (1993) Lithochemical techniques using immobile elements. *J. Geochem. Explor.*, **48**, 109-133.
- Maslov V.A., Artyushkova O.V. (2010) Stratigraphy and correlation of Devonian deposits of the Magnitogorsk megazone of the Southern Urals. Ufa, DesignPolygraph-Service Publ., 288 p. (In Russ.)
- McDonough W.F., Sun S. (1995) The composition of the Earth. *Chem. Geol.*, **120**, 223-253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4)
- Middlemost E.A.K. (1994) Naming materials in magma/igneous rock system. *Earth Sci. Rev.*, **37**, 215-224. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90029-9)
- Miyashiro A. (1973) The Troodos ophiolitic complex was probably formed in an island arc. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **19**, 218-224. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(73\)90118-0](https://doi.org/10.1016/0012-821x(73)90118-0)
- Moore G., Carmichael I.S.E. (1998) The hydrous phase equilibria (to 3 kbar) of an andesite and basaltic andesite from western Mexico: Constraints on water content and conditions of phenocryst growth. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **130**, 304-319.
- Morimoto N., Fabries J., Ginzburg A.K., Ross M., Seifert M.F.A., Zussman J.K., Aoki J.K., Gottardi G. (1988) Nomenclature of pyroxenes. *Amer. Miner.*, **73**, 1123-1133.
- Neave D., Putirka K.D. (2017) A new clinopyroxene-liquid barometer, and implications for magma storage pressures under Icelandic rift zones. *Amer. Miner.*, **102**, 777-794.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.06.016>
- Pearce J.A. (2014) Immobile Element Fingerprinting of Ophiolites. *Elements*, **10**, 101-108.
- Plotinskaya O.Yu. (2023) Porphyry-epithermal systems of the Urals: Sources of matter, evolution and zoning. Abstract Cand. geol. and min. sci. diss. Moscow, IGEM RAN, 39 p. (In Russ.)
- Plotinskaya O.Yu., Grabezhev A.I., Tessalina S., Seltmann R., Groznova E.O., Abramov S.S. (2017) Porphyry deposits of the Urals: Geological framework and metallogeny. *Ore Geol. Rev.*, **85**, 153-173. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.07.002>
- Putirka K.D. (2008) Thermometers and Barometers for Volcanic Systems. *Rev. Mineral. Geochem.*, **69**, 61-120. <https://doi.org/10.2138/rmg.2008.69.3>
- Putirka K.D. (2016) Amphibole thermometers and barometers for igneous systems and some implications for eruption mechanisms of felsic magmas at arc volcanoes. *Amer. Miner.*, **101**, 841-858. <http://doi.org/10.2138/am-2016-5506>
- Putirka K.D., Busby C. (2007) The tectonic significance of high-K<sub>2</sub>O volcanism in the Sierra Nevada, California. *Geology*, **35**(10), 923-926.
- Putirka K.D., Mikaelian H., Ryerson F., Shaw H. (2003) New clinopyroxene-liquid thermobarometers for mafic, evolved, and volatile-bearing lava compositions, with applications to lavas from Tibet and the Snake River Plain, Idaho. *Amer. Miner.*, **88**, 1542-1554. <https://doi.org/10.2138/am-2003-1017>
- Seravkin I.B., Kosarev A.M., Salikhov D.N., Znamensky S.E., Rodicheva Z.I., Rykus M.V., Snachev V.I. (1992) Volcanism of the Southern Urals. Moscow, Nauka Publ., 197 p. (In Russ.)
- Shishakov V.B., Sergeeva N.E., Surin S.V. (1988) Voznesensk porphyry copper deposit in the Southern Urals. *Geol. Rud. Mestorozhd.*, (2), 85-90. (In Russ.)
- Shkolnik S.I., Reznitsky L.Z., Belichenko V.G., Barash I.G. (2009) Geochemistry, issues of petrogenesis and geodynamic position of metavolcanics of the Tunka terrane (Baikal-Khuvsgul region). *Geol. Geofiz.*, **50**(9), 1013-1024. (In Russ.)

- Wang X., Hou T., Wang M., Zhang C., Zhang Z., Pan R., Marxer F., Zhang H. (2021) A new clinopyroxene thermobarometer for mafic to intermediate magmatic systems. *Eur. J. Mineral.*, **33**, 621-637. <https://doi.org/10.5194/ejm-33-621-2021>
- White W.M., Klein E.M. (2014) Composition of the Oceanic Crust. *Treatise on Geochemistry*, Ch. 4.13, 457-496. <http://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00315-6>
- Winchester J.A., Floyd P.A. (1976) Geochemical magma type discrimination: Application to altered and metamorphosed igneous rock. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **28**, 459-469.
- Wu Z., Barosh P., Zhang Q., Wu J., Yang Y. (2018) A thickness Gauge for the lithosphere based on Ce/Yb and Sm/Yb of mantle-derived magmatic rocks. *Acta Geol. Sinica*, **92**(6), 2120-2135.
- Znamensky S.E. (2021) Petrological and geochemical characteristic of the rocks of the Voznesensky intrusive massif (Southern Urals): On the question of the composition and sources of magmas producing gold and copper porphyry mineralization. *Lithosphere (Russia)*, **21**(3), 365-385. (In Russ.)
- Znamensky S.E., Holodnov V.V. (2018) Petrological-geochemical features of ore-bearing effusive and intrusive rocks of the Nikolaevskoe gold-porphyry deposit (the Southern Urals). *Lithosphere (Russia)*, **18**(4), 607-620. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-4-607-620>
- Znamensky S.E., Artemyev D.A., Ankusheva N.N. (2022) REE in the Calcite of Au-Cu Porphyry Mineralization at the Kutuevsky Occurrence, South Urals: LA-ICP-MS Data. *Geoschem. Int.*, **60**(9), 830-840.
- Znamensky S.E., Kosarev A.M., Shafigullina G.T. (2019) Facies composition, geochemical features and geodynamic settings of the formation of the Late Emsian island-arc complexes of the Main Ural Fault zone in the Southern Urals. *Vestn. Perm. un-ta. Geologiya*, **18**(1), 1-16. (In Russ.)
- Znamensky S.E., Kosarev A.M., Shafigullina G.T. (2022) Karagaikul gold-porphyric ore occurrence (South Urals): Geochemistry and petrogenesis of intrusive rock, composition of minerals of near-ore metasomatites and ores. *Georesursy = Georesources*, **24**(3), 187-196. (In Russ.) <https://doi.org/10.18599/grs.2022.3.16>