



<https://doi.org/10.35597/2313-545X-2025-12-1-2>
УДК 552.18:553:21

Условия кристаллизации гранитоидов массива Южный (Северо-Восточный Таймыр, Россия)

Ю.В. Кисельников, А.Г. Шнейдер, В.Ф. Проскурнин

Всероссийский геологический научно-исследовательский институт им. А.П. Карпинского,
Средний пр. В.О. 74, г. Санкт-Петербург, 199106 Россия; yury.kiselnikoff@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 00.00.2025 г., после доработки 00.00.2026 г., принята к печати 00.00.2026 г

Аннотация. С помощью минеральной геотермобарометрии, изучения эвтектических кварц-полевошпатовых сростаний и анализа особенностей контактового метаморфизма получены согласующиеся оценки условий кристаллизации постколлизийных позднепалеозойско-раннемезозойских гранитоидов массива Южный на северо-восточном Таймыре (Россия). Химический состав равновесно сосуществующих амфибола и плагиоклаза в гранитоидах указывает на следующие параметры кристаллизации: $T = 680\text{--}760$ °С, $P = 2.8\text{--}3.4$ кбар при содержании H_2O в расплаве 3.5–4.5 мас. %. Содержание TiO_2 (1.8–3.9 мас. %) и Al_2O_3 (13.8–15.0 мас. %) свойственны биотиту из пород мезоабиссальной фации. Содержание кварца в графических агрегатах (~33 % в кварц-калишпатовых и 43 % в кварц-олигоклазовых) и низкие значения основности плагиоклаза (не более 10 %) свидетельствуют о величине общего давления ~3 кбар. В метапелитах контактового ореола развита ассоциация кордиерит-андалузит-кварц-ставролит, которая характеризует нижнюю границу поля устойчивости железистого ставролита (величина P соответствует 2–3 кбар). Изученные гранитоиды кристаллизовались на умеренных глубинах (7–11 км) из магмы с низким содержанием воды. По указанным признакам гранитоиды следует считать нерудоносными, однако не исключается возможность обнаружения более поздней (наложенной) Мо-Си-порфировой минерализации, связанной с малыми гипабиссальными телами среднего-позднего триаса.

Ключевые слова: амфибол-плагиоклазовая геотермобарометрия, эвтектические агрегаты, Таймыр, гранитоиды, металлогенический анализ, оценка рудоносности, гранитоидный массив Южный.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Федерального агентства по недропользованию (Роснедра) № 41915500.

Благодарности. Авторы выражают благодарности к.г.-м.н. Е.В. Пушкареву (Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия) и к.г.-м.н. Е.Н. Перовой (Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия) за консультации, анонимному рецензенту за ценные рекомендации по улучшению рукописи и В.Н. Кириллову и Е.Л. Грузовой за помощь в аналитических исследованиях (Всероссийский геологический научно-исследовательский институт им. А.П. Карпинского, г. Санкт-Петербург, Россия).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанных с рукописью.

Вклад авторов. Ю.В. Кисельников – полевые исследования, оптическая микроскопия, СЭМ анализ, геологическая интерпретация, написание и редактирование рукописи; А.Г. Шнейдер – организация полевых работ, полевые работы; В.Ф. Проскурнин – полевые работы, общее руководство исследованиями, редактирование рукописи. Все авторы одобрили финальную версию статьи перед публикацией.

Для цитирования: Кисельников Ю.В., Шнейдер А.Г., Проскурнин В.Ф. Условия кристаллизации гранитоидов массива Южный (Северо-Восточный Таймыр, Россия). *Минералогия*, 2026, 12(1), 17–36. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2025-12-1-2>

Crystallization conditions of granites of the Yuzhny pluton (Northeast Taimyr, Russia)

Yu.V. Kisel'nikov, A.G. Shneider, V.F. Proskurnin

Karpinsky Geological Research Institute, Sredniy pr. V.O. 74, St. Petersburg, 199106 Russia;

yury.kisel'nikoff@yandex.ru

Received 00.00.2025, revised 00.00.2025 accepted 00.00.2026

Abstract. Consistent crystallization conditions are estimated for postcollision Late Paleozoic–Early Mesozoic granitoids of the Yuzhny pluton in the northeastern part of the Taimyr Peninsula (Russia). The chemical composition of equilibrated amphiboles and plagioclase in granitoids points to a crystallization temperature of 680–760 °C, a pressure of 2.8–3.4 kbar, and the H₂O content of melt of 3.5–4.5 wt. %. The content of TiO₂ (1.8–3.9 wt. %) and Al₂O₃ (13.8–15.0 wt. %) of biotite are typical of rocks of mesoabyssal plutons. The amount of quartz in micropegmatitic aggregates (~33 % in oligoclase matrix and 43 % in K-feldspar matrix) and the composition of associated feldspars (the anorthite content does not exceed 10 %) indicate a general pressure of ~3 kbar. Metapelites from the contact halo contain a critical mineral assemblage consisting of cordierite, andalusite, quartz and staurolite, which corresponds to the lower limit of the staurolite stability field in metapelites indicating a crystallization pressure of 2–3 kbar. The studied granitoids crystallized at a moderate (mesoabyssal) depth of 7–11 km (within the field of skarn and some and albitite-greisen deposits) from H₂O-depleted magma. These features are typical of barren granitoids, however, some late porphyry Cu-Mo mineralization can be associated with the Middle to Late Triassic small hypabyssal plutons.

Keywords: amphibole-plagioclase geothermobarometry, eutectic quartz-feldspar aggregates, Taimyr Peninsula, granitoids, metallogenic analysis, ore potential assessment, Yuzhny granitic pluton.

Funding. This work was supported by state contract no. 41915500 of the Federal Agency for Mineral Resources of the Russian Federation.

Acknowledgements. We are grateful to Cand. Geol.-Mineral. Sci. E.V. Pushkarev (Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, Yekaterinburg, Russia) and Cand. Geol.-Mineral. Sci. E.N. Perova (St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia) for consultations, an anonymous reviewer for valuable recommendations, which allowed the improvement of the manuscript, and V.N. Kirillov and E.L. Gruzova (Karpinsky Geological Research Institute, St. Petersburg, Russia) for help in analytical studies.

Conflict of interest. The authors declare that they have no conflicts of interest.

Author contribution. Y.V. Kisel'nikov – field studies, optical microscopy, SEM-EDS analysis, geological interpretation, writing and editing of the manuscript; A.G. Shneider – field studies, fieldwork organization; V.F. Proskurnin – field studies, general research management, editing of the manuscript. All the author approved the final version of the manuscript prior to publication.

For citation: Kisel'nikov Yu.V., Shneider A.G., Proskurnin V.F. Crystallization conditions of granites of the Yuzhny pluton (Northeast Taimyr, Russia). *Mineralogy*, 2026, 12(1), 17–36. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2025-12-1-2>

ВВЕДЕНИЕ

Гранитоиды являются одной из ключевых составных частей континентальной земной коры – они формируются в различных геодинамических обстановках и в ряде случаев играют решающую роль в процессе развития месторождений полезных ископаемых (Ферштатер, 1987; Pitcher, 1997). Оруденение, связанное с гранитоидами, образуется во вмещающей среде различного состава и на различных гипсометрических уровнях. Например, гипабиссальные и субвулканические комплексы вмещают Cu-Mo порфирировую и эпитегрмальную мине-

рализацию (Изох, 1978; Жариков, Русинов, 1998), тогда как абиссальные интрузивы – альбитит-грейзеновые и пегматитовые месторождения (Strong, 1981). В связи с этим реконструкция условий становления магматических пород (в т. ч. фациальный анализ глубинности) представляется перспективным направлением и для прикладных металлогенических исследований.

Цель данной работы состояла в определении условий формирования (*T*, *P*, глубина, водонасыщенность магмы) гранитоидов массива Южный (северо-восточный Таймыр, Россия) для оценки их рудогенерирующего потенциала. В северном

экзоконтакте плутона и в надинтрузивной зоне не-вскрытого сателлита расположены жильные сульфидно-кварцевые рудопроявления самородного золота, сопряженные с пропилитами эпидот-хлоритовой фации и березитами фации кварц-анкерит-серицит. До сих пор остается неясным, могут ли рассматриваемые гранитоиды выступать в качестве рудоконтролирующего фактора, либо же формирование минерализации, главным образом, связано с наложенным магматизмом (Беззубцев и др., 1979ф; Качурина и др., 2013; Проскурнин, 2013).

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

Верхнепалеозойско-раннемезозойский массив Южный приурочен к Центрально-Таймырской структурно-формационной зоне (рис. 1), образованной во время байкальской эпохи складчатости (Качурина и др., 2013; Проскурнин и др., 2021; Дворцов и др., 2025; Vernikovskiy et al., 2020). В состав этой зоны входят, преимущественно, островодужные и внутриокеанические комплексы. По Главному Таймырскому разлому она граничит с Северо-Таймырской зоной, которая представляла собой континентальную окраину Карского микроконтинента, по Пясино-Фаддеевскому – с Южно-Таймырской, соотносимой с пассивной окраиной Сибири (Верниковский, 1996; Проскурнин, 2013).

Изученный массив входит в состав Лодочниковской структурно-металлогенической зоны, развитие которой связывается с косою коллизией Сибири и Карского микроконтинента в герцинскую-раннекиммерийскую эпохи складчатости (Проскурнин и др., 2021; Vernikovskiy, 2020). Здесь известны проявления молибден-порфирирового типа минерализации: кварц-турмалиновые и кварц-сульфидные штокерки с молибденитом, сопровождаемые обширными проявлениями серицит-хлоритовых метасоматитов (Берзон и др., 2021).

Массив образует крупное лополитообразное тело (рис. 1), вытянутое в направлении СЗ-ЮВ с общей площадью выходов на дневной поверхности около 340 км². Вследствие своей постколлизивной природы, он занимает дискордантное (поперечное) положение относительно региональных складчатых структур. Массив неоднороден и состоит, по крайней мере, из двух фаз внедрения. Главная фаза (нормальные и субщелочные двуполевошпатовые биотит-роговообманковые диориты, монцониты, граниты, граносиениты с крупнопорфировидной текстурой, рис. 2А, Б, Г) выполняет основной объ-

ем массива и соотносится с Южнолодочниковским комплексом позднего палеозоя (Дворцов и др., 2025). Rb-Sr и U-Pb возраст минералов и пород изученного массива составляет 252–256 млн лет (Khudoley et al., 2018; Vernikovskiy et al., 2020; Дворцов и др., 2025). Согласно данным гравиразведки контактовая поверхность массива падает к его центру под углами 40–60°; его нижняя кромка располагается на глубине 0.8–1.0 км, в магнитном поле массив не создает значимые аномалии (Падерин и др., 2005ф, Лазарев и др., 1997ф).

Вторая фаза (Равич, Чайка, 1962; Падерин и др., 2005ф; Качурина и др., 2013) развивается повсеместно в виде маломощных жильных обособлений пегматитов и аплитовидных гранитов (рис. 2Д, Е). На геологической схеме (рис. 1) данная фаза не выражается в масштабе и потому самостоятельно не обозначена.

Вблизи массива (на расстоянии до 4 км) в боковых породах выделяется зона приконтактных деформаций, для которой свойственны простые нормальные опрокинутые и сдвиговые складки (Беззубцев и др., 1979ф). Типичное для региона северо-восточное простирание пород становится крайне изменчивым и, в целом, конформным контуру тела гранитоидов. Такие особенности локальных складчатых структур в боковых породах говорят о пластических деформациях, «катализатором» которых стало тепло внедряющейся магмы.

Контакт массива с вмещающими породами неровный и постепенный со множеством апофиз и ксенолитов (рис. 2В). В единичных обнажениях наблюдались шпирь меланократовых (существенно роговообманковых) габбро (рис. 2Г), ориентированных в соответствии с границей главного тела.

Ороговикование проявилось обширно. Термическая проработка вмещающих толщ происходила в условиях альбит-эпидот-роговиковой и амфибол-роговиковой фаций (Беззубцев и др., 1979ф; Качурина и др., 2013). К северо-западу от массива (от основного тела) на глубине около 2 км располагается его сателлит (рис. 1), с которым связывается обширная отрицательная гравиметрическая аномалия со значениями до –26 мГал (Лазарев и др., 1997ф) и ореол контактового метаморфизма площадью около 90 км² (Кисельников и др., в печати). Очертания ореола по отношению ко вмещающим породам дискордантны; метаморфические преобразования фиксируются на удалении до 3–7 км от выходов главного тела. В метаморфизованных породах кислото-среднего состава развивается спес-

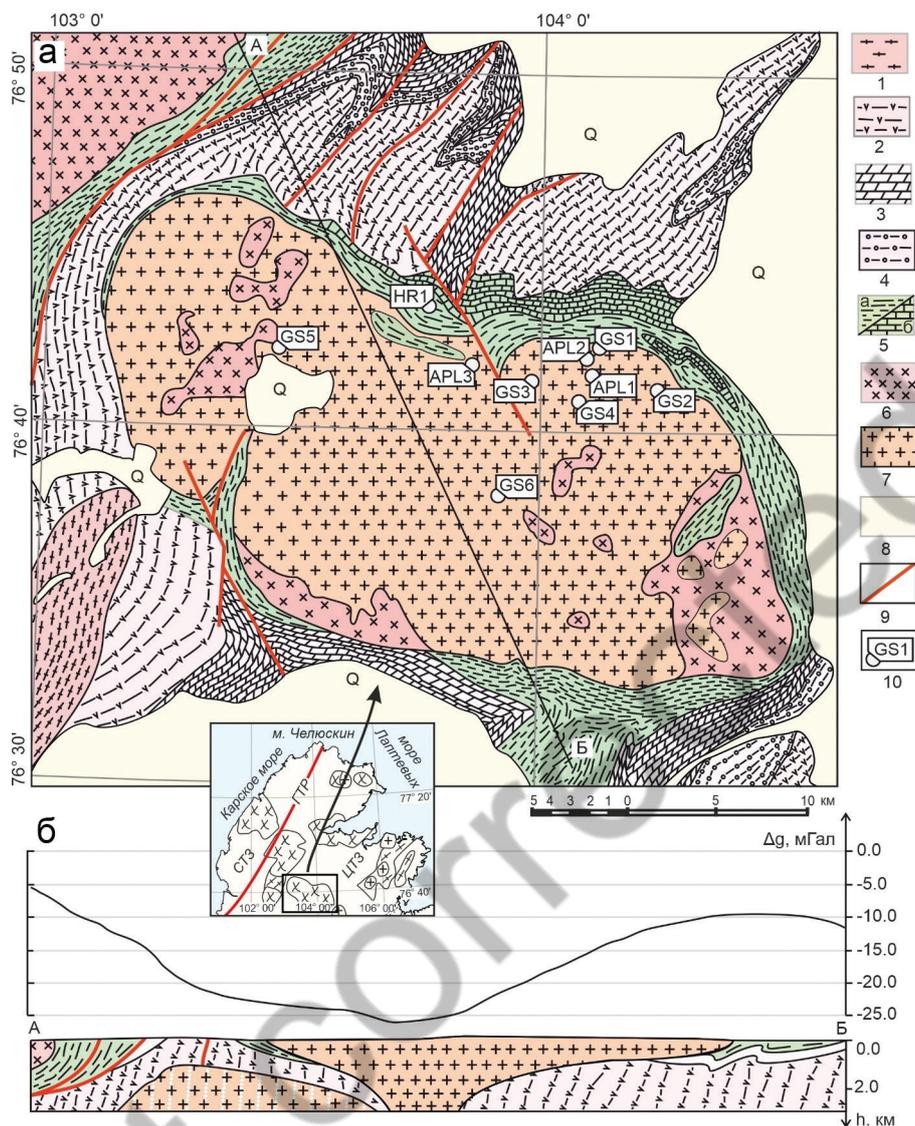


Рис. 1. Геологическая схема массива Южный, составлена по данным (Падерин и др., 2005ф; Качурина и др., 2013; Проскурнин и др., 2021) с дополнениями авторов (а) и геолого-геофизический разрез по (Лазарев и др., 1997ф) с дополнениями авторов (б).

1 – гнейсы верхнего протерозоя; 2 – метаморфические хлорит-эпидотовые ортосланцы и метадацит-порфиры верхнего протерозоя; 3 – доломиты верхнего венда; 4 – кварцевые конгломераты и песчаники верхнего венда; 5 – осадочные толщи нижнего кембрия – среднего ордовика (а – существенно углеродистые; б – известковые); 6, 7 – позднепалеозойско-раннемезозойские гранитоиды массива Южный: 6 – нормально-щелочные; 7 – умеренно щелочные; 8 – мелчетвертичные отложения; 9 – разрывные нарушения; 10 – точки отбора и шифры проб, в которых определены РТ условия. На географической врезке – положение массива в структурах района по (Верниковский, 1996; Проскурнин, 2013): ЦТЗ – Центрально-Таймырская структурно-тектоническая зона; ГТР – Главный Таймырский разлом; СТЗ – Северо-Таймырская структурно-тектоническая зона.

Fig. 1. Geological scheme of the Yuzhny pluton, modified after (Paderin et al., 2005; Kachurina et al., 2013; Proskurnin et al., 2021) (a) and geological-geophysical cross-section, modified after (Lazarev et al., 1997) (б).

1 – Upper Proterozoic gneiss; 2 – Upper Proterozoic metamorphic chlorite-epidote orthoschist and metadacite porphyry; 3 – Upper Vendian dolomite; 4 – Upper Vendian quartz conglomerate and sandstone; 5 – Lower Cambrian – Middle Ordovician sedimentary rocks (a – mostly carbonaceous; б – calcareous); 6, 7 – Late Paleozoic-Early Mesozoic granitoids of the Yuzhny pluton: 6 – normally alkaline; 7 – moderately alkaline; 8 – Cretaceous-Quaternary deposits; 9 – faults; 10 – sampling points and labels of samples with identified PT conditions. Geographical inset shows the position of the pluton within regional structures after, (Vernikovskiy, 1996; Proskurnin, 2013): ЦТЗ – Central Taimyr structural-tectonic zone; ГТР – Main Taimyr Fault; СТЗ – North Taimyr structural-tectonic zone.



Рис. 2. Маршрутные фотографии, характеризующие особенности геологического строения массива Южный: А, Б – плитчатая отдельность в гранитоидах главной фазы; В – ксенолиты вмещающих пород; Г – шликер меланократового амфибол-биотитового габбро; Д, Е – жилы аплитовидных лейкогранитов.

Fig. 2. Peculiarities of geological structure of the Yuzhny pluton: А, Б – platy jointing in the main phase granitoids; В – xenoliths of host rocks; Г – schlieren of melanocratic amphibole-biotite gabbro; Д, Е – veins of aplitic leucogranites.

сартин, который, согласно (Соболев, 1964), свойственен для контактово-метаморфических ореолов. К-Аг возраст биотита (253 ± 5 млн лет) из метаморфического ореола согласуется со временем внедрения главной фазы (Кисельников и др., в печати).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Внутренняя часть массива и его приконтактовые зоны изучались в геолого-съёмочных маршрутах масштаба 1 : 50 000. В ходе маршрутов отобрано около 300 образцов гранитоидов и вмещающих пород. Петрографические шлифы, приготовленные из сколков пород, изучались на оптическом микроскопе Leica DM2700P.

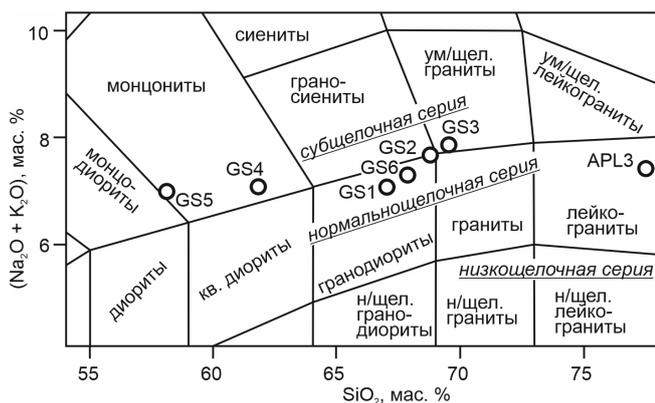


Рис. 3. Положение состава изученных образцов массива Южный на диаграмме $\text{SiO}_2 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$, поля показаны по (Шарпёнок и др., 2013).

Fig. 3. Position of composition of the studied samples of the Yuzhny pluton in $\text{SiO}_2 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ diagram, fields are shown after (Sharpenok et al., 2013).

Пробоподготовка, микроанализ и определение валового химического состава гранитоидов проводились в Центральной аналитической лаборатории Всероссийского геологического научно-исследовательского института им. А.П. Карпинского (г. Санкт-Петербург, Россия). Штуфы гранитоидов весом 300–400 г, не затронутых химическим выветриванием, измельчались на щековых дробилках до фракции –1 мм, квартовались на делителе Джонса и истирались до крупности 200 меш. Из данного материала отбирались аналитические навески весом ~800 мг, которые впоследствии прокаливались при 950 °С для определения количества летучих компонентов, а затем сплавлялись при 1050 °С в таблетки в пропорции 1 : 9 с флюсом из смеси мета- и тетрабората Li в муфельной печи. Анализ содержаний петрогенных элементов (в форме оксидов) проводился в вакууме с использованием государственных стандартных образцов горных пород на рентгенофлуоресцентном спектрометре ARL 9800 (аналитик В.Н. Кириллов). Ошибка анализа для компонентов с содержаниями более 1–5 мас. % составила 1–2 отн. %, при содержаниях менее 0.5 мас. % погрешность возрастает до 5 отн. %. Нижний предел обнаружения для различных компонентов находится на уровне от 0.01 до 0.05 мас. %.

Химический состав минералов в полированных препаратах изучался на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) CamScan MV 2300, оснащённом энергодисперсионным спектрометром (ЭДС) LINK Pentafet (аналитик Е.Л. Грузова) при ускоряющем напряжении 20 кВ, времени накопле-

ния спектра 30 с, токе зонда 75 нА и диаметре пучка 3 мкм. Для количественного анализа содержания элементов использован набор стандартов «Micro-Analysis Consultants Ltd.» № 4911: Si – кварц, Al – корунд, Ti – Ti металлический, Fe – Fe_3C , Mn – Mn металлический, Mg – периклаз, Ca – волластонит, Na – альбит, K – ортоклаз, Cl – хлорапатит.

Формула амфиболов имеет вид $\text{A}_{0.1}\text{B}_2\text{C}_5\text{T}_8\text{O}_{22}(\text{Y})_8$. В позицию А в переменных количествах входят крупные катионы: K^+ , Na^+ , иногда Ca^{2+} , но нередко позиция остается вакантной; позицию В занимают Ca^{2+} и Na^+ , реже Fe^{2+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} , Li^+ ; в октаэдрической позиции С размещаются катионы Mg^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Al^{3+} , Fe^{3+} ; в тетраэдрической позиции Т находится, преимущественно, Si^{4+} , в подчиненных количествах может присутствовать Al^{3+} ; в позиции Y располагаются дополнительные анионы: $(\text{OH})^-$, F^- , Cl^- . Нижний индекс у обозначения химического элемента означает принадлежность той или иной кристаллохимической позиции. Формулы амфиболов рассчитывались на $\text{C} + \text{T} = 13$ катионов согласно рекомендациям Международной минералогической ассоциации (Hawthorne et al., 2012). Разделение между Fe^{3+} и Fe^{2+} проведено методом баланса электронейтральности формулы (Кривошечев, Гульбин, 2022). Оценка условий кристаллизации проведена по геотермобарометрам, основанным на экспериментальных данных плавления и кристаллизации гранитных расплавов (Ферштатер, 1987; Riddolfi et al., 2009; Mutch et al., 2016). Условия их применимости рассмотрены в тексте. Для расчетов использованы СЭМ-ЭДС анализы породообразующих минералов: амфиболов – 16, плагиоклазов – 19, биотита – 27.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Петрография и минералогия гранитоидов массива Южный

Главная фаза внедрения представлена крупно-среднекристаллическими порфириновидными кварцсодержащими двуполевошпатовыми биотитроговообманковыми породами, однообразными в структурно-текстурном отношении, но с разным петрографическим составом. Будучи связаны друг с другом постепенными переходами, на TAS диаграмме они располагаются вблизи границы нормальной и субщелочной магматических серий (рис. 3, табл. 1) и соответствуют монцодиоритам, диоритам, монцонитам, кварцевым диоритам, граноси-

Таблица 1. Химический состав гранитоидов массива Южный (мас. %)
 Table 1. Chemical composition of granitoids of the Yuzhny pluton (wt. %)

Образец	GS1	GS2	GS3	GS4	GS5	GS6	APL1
SiO ₂	67.00	68.70	69.50	61.80	58.30	67.80	77.80
TiO ₂	0.50	0.34	0.44	0.63	0.58	0.28	0.28
Al ₂ O ₃	17.00	15.70	16.50	18.3	15.50	13.70	14.00
Fe ₂ O ₃ _{общ}	3.89	2.95	2.57	4.87	8.75	5.29	0.40
MnO	0.05	0.07	0.03	0.06	0.08	0.06	0.01
MgO	1.93	1.03	0.62	2.89	3.22	1.23	0.05
CaO	2.97	2.60	1.91	4.12	3.94	2.10	0.84
Na ₂ O	3.52	3.99	4.29	4.05	3.59	3.47	2.66
K ₂ O	3.54	3.70	3.63	3.02	3.53	3.91	4.70
P ₂ O ₅	0.21	0.18	0.11	0.33	0.31	0.16	0.03
П.П.П.	0.56	0.36	0.79	0.61	0.64	0.22	0.28
Сумма	101.00	99.60	100.00	101.00	98.44	98.22	101.04
FeO	1.37	1.11	1.13	1.28	–	–	0.44
Fe ₂ O ₃	2.27	1.65	1.31	3.23	–	–	<0.30
Na ₂ O+K ₂ O	7.1	7.7	7.9	7.1	7.1	7.4	7.4
K ₂ O/Na ₂ O	1.0	0.9	0.9	0.8	1.0	1.1	1.8

Примечание. Прочерк – элемент не определялся. Содержания FeO и Fe₂O₃ определены титриметрией.
 Note. Dash – not analyzed. The FeO and Fe₂O₃ content are determined by titrimetry.

енитам, гранодиоритам и гранитам. Главные темноцветные минералы (роговая обманка и биотит) преобладают в наиболее основных разновидностях пород, и по мере увеличения кремнекислотности их количество снижается.

Структура пород гипидиоморфнозернистая с элементами монцитовой (рис. 4А). Плагиоклаз наблюдается в виде таблитчатых кристаллов с отчетливой зональностью: центр сложен андезином An_{25–30}, краевые зоны – олигоклазом An_{15–20}. Крупные ксеноморфные зерна ортоклаза содержат как многочисленные пертитовые вроски олигоклаза, так и мелкие таблитчатые кристаллы андезина. На контакте ортоклаза и плагиоклаза образуются тонкая (10–20 мкм) кайма альбита (вероятно, связанная с поздними автотомасоматическими процессами) и мирмекитовые сростки кварца (чаще всего, в олигоклазе An_{10–20}).

Главные минералы представлены биотитом и амфиболом. Биотит формирует крупные (до 3 мм) чешуйки с плеохроизмом в коричневых тонах, по химическому составу он соответствует промежуточной разновидности ряда флогопит-аннит с железистостью Fe / (Fe + Mg) около 40–60 % (электронное приложение).

Амфибол образует крупные идиоморфные кристаллы размером 1–3 мм, сильно плеохроирующие в зеленых и бледно-зеленых оттенках (рис.

3А, 5А). По результатам СЭМ-ЭДС анализа (табл. 2), заполненность вакансий в позиции А катионами щелочных металлов (Na, K) относительно невысокая, только в отдельных анализах она достигает 0.5 а.ф. В позиции В преобладает Са, в позиции С количество Fe³⁺ выше, чем Al, в совокупности с содержаниями Mg и Fe это позволяет определить амфибол как ферри-магнезиогорнблендит (рис. 5Б).

Акцессорные минералы (фторапатит, циркон, титанит) встречаются в виде одиночных мелких (0.05–0.10 мм) идиоморфных кристаллов, рассеянных в амфиболе, биотите и, реже, полевых шпатах.

Лейкограниты жильной фазы обладают массивной текстурой, мелкозернистой аллотриоморфной структурой с элементами графической (рис. 6). Нередки линзовидные обособления пегматитов с эвтектическими сростаниями кварца и калиевого полевого шпата.

Олигоклаз (An_{10–15}), ортоклаз и, реже, микроклин присутствуют отдельно в виде ксеноморфных зерен. Биотит является одним из главных минералов и характеризуется зеленовато-коричневой окраской и относительно железистостью ~50 % (электронное приложение). Фторапатит, циркон и титанит образуют редкую рассеянную вкрапленность небольших зерен призматического облика размером приблизительно 0.05–0.10 мм.

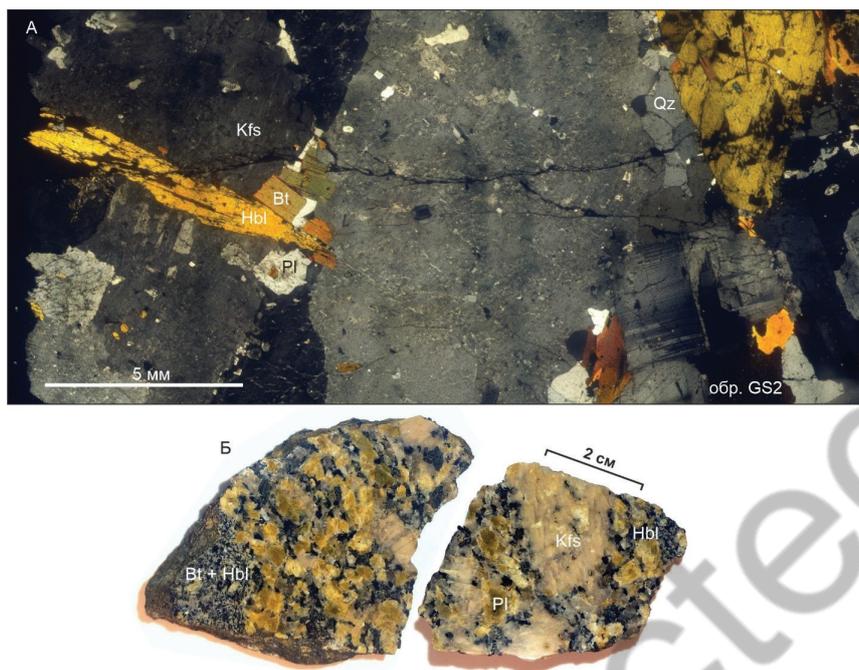


Рис. 4. Структурно-текстурные особенности гранитоидов главной фазы массива Южный: А – гипидиоморфнозернистая структура с идиоморфным плагиоклазом (Pl) и роговой обманкой (Hbl), шлиф, николи скрещены; Б – порфиридная структура, обусловленная крупными включениями (порфиробластами?) калиевого полевого шпата (Kfs). Здесь и далее: Qz – кварц, Bt – биотит.

Fig. 4. Structural and textural peculiarities of the main phase granitoids of the Yuzhny pluton: A – subhedral-granular structure with euhedral plagioclase (Pl) and hornblende (Hbl), thin section, crossed nicols; B – porphyritic structure with large inclusions (porphyroblasts?) of K-feldspar (Kfs). Hereinafter: Qz – quartz; Bt – biotite.

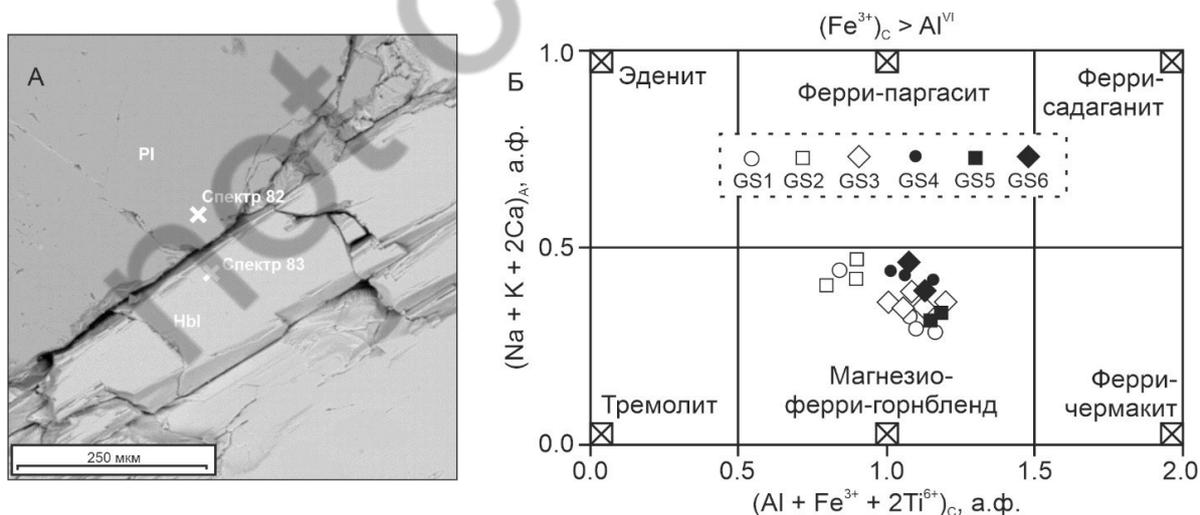


Рис. 5. А – Кристаллы роговой обманки (Hbl) и плагиоклаза (Pl) в гранитоидах массива Южный, BSE фото; Б – состав амфиболов на классификационной диаграмме (Hawthorne et al., 2012).

Fig. 5. A – Plagioclase (Pl) and amphibole (Hbl) crystals in granitoids of the Yuzhny pluton, BSE photo; B – composition of amphiboles in classification diagram of (Hawthorne et al., 2012).

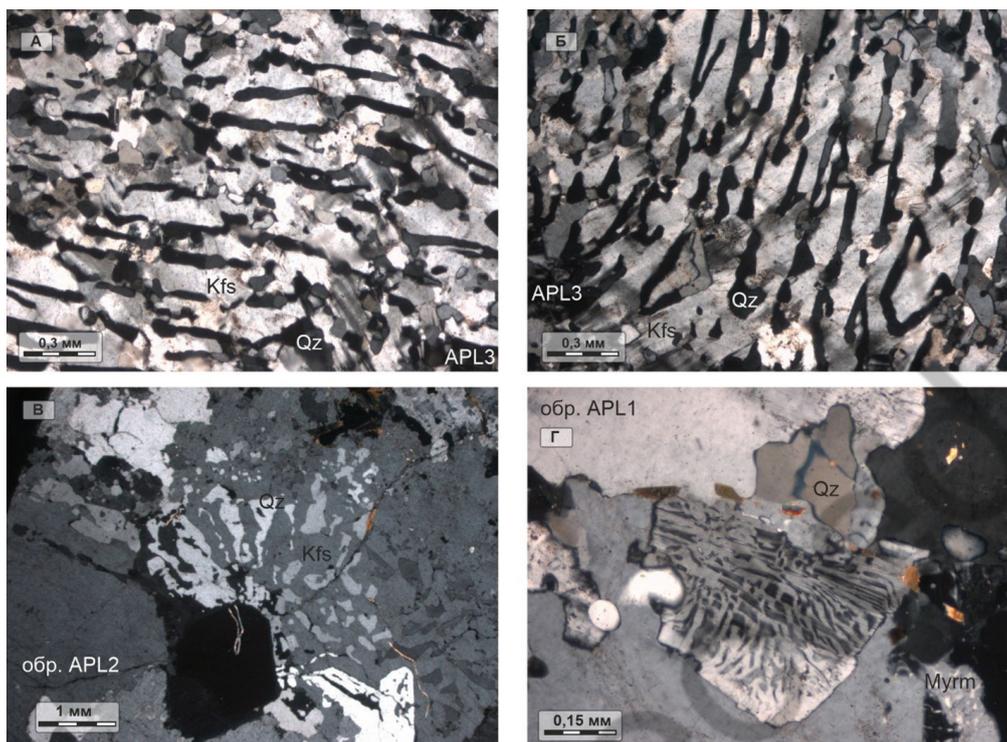


Рис. 6. Графические кварц-полевошпатовые агрегаты в аплитовидных лейкогранитах массива Южный с обособлениями пегматитов, отличающиеся от мирмекитовых вростков (Myrm) прямолинейными очертаниями и Г-образной формой. Фотографии шлифов, николи скрещены.

Fig. 6. Graphic quartz-feldspar aggregates in aplitic leucogranites of the Yuzhny pluton with pegmatites, which differ from myrmekite intergrowths (Myrm) in straight contours and Г-shaped morphology. Thin sections, crossed nicols.

Геотермобарометрия гранитоидов массива Южный

Условия кристаллизации пород оценены тремя независимыми способами по контактовым метаморфическим породам, ассоциации амфибол-плагиоклаз и микрографическим срастаниям кварца с полевыми шпатами.

Геотермобарометрия по ассоциации амфибол-плагиоклаз в гранитоидах. Применимость соответствующих амфибол-плагиоклазовых геотермобарометров определяется равновесным сосуществованием кварца, калиевого полевого шпата, андезина, биотита и роговой обманки в породе (Anderson, 1996). Температура и давление рассчитаны на основе изоморфных замещений в амфиболе и плагиоклазе. «Помехами» при подобных исследованиях являются обменные реакции, причиной которых выступает экстремальная активность кислорода fO_2 . Так, при очень низкой фугитивности O_2 в расплаве Fe^{2+} преобладает над Fe^{3+} и происходит изоморфное замещение Mg и Si на Al, в резуль-

тате чего значения расчетного давления завышаются. Напротив, при весьма высокой фугитивности O_2 значительная часть Fe присутствует в виде Fe^{3+} , которое интенсивно замещает Al^{3+} в амфиболе, в результате чего оценки давления всегда систематически занижены.

Считается, что при следующих параметрах амфиболы пригодны для геотермобарометрических исследований: допустимая общая железистость (#Fe) от 0.40 до 0.65, необходимая доля Fe^{3+} относительно суммы ($Fe^{2+} + Fe^{3+}$) не менее 0.25 или, в крайнем случае, не менее 0.20 (Anderson, Smith, 1995). Из 19 анализов амфиболов нами использовано 16, которые удовлетворяют указанным критериям, три анализа исключены из рассмотрения из-за низкого содержания Fe^{3+} (табл. 2): № 1 (обр. GS1), № 5 и № 6 (обр. GS2). В различных породах (от монцитов до субщелочных гранитов, рис. 3) в амфиболах не наблюдаются существенные отличия в химическом составе (рис. 5Б), что, по всей видимости, обусловлено формированием пород в близких условиях во время внедрения главной фазы.

Таблица 2. Химический состав (мас. %) и кристаллохимические коэффициенты амфиболов в гранитоидах массива Южный

Table 2. Chemical composition (wt.%) and atoms per formula units of amphiboles of the Yuzhny pluton

Образец	GS1	GS1	GS1	GS1	GS2	GS2	GS2	GS2	GS2	GS3	GS3	GS3	GS3	GS3	GS3	GS3	GS3	GS3	GS3	GS4	GS4	GS4	GS4	GS4	GS5	GS5	GS5	GS5	GS5	GS5	GS6	GS6	GS6	GS6	GS6	GS6		
№ ан.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	GS4	GS4	GS4	GS4	GS4	GS5	GS5	GS5	GS5	GS5	GS6								
SiO ₂	46.51	46.45	45.88	45.67	46.80	45.55	45.79	45.01	47.13	46.90	46.64	46.96	44.41	44.64	45.68	44.99	45.47	44.47	46.29	GS4	GS4	GS4	GS4	GS4	GS5	GS5	GS5	GS5	GS5	GS6								
TiO ₂	1.57	0.66	0.85	0.99	1.24	1.40	1.30	1.05	1.15	0.84	1.24	0.87	1.06	1.25	1.04	1.22	1.42	1.00	1.20	GS4	GS4	GS4	GS4	GS4	GS5	GS5	GS5	GS5	GS5	GS6								
Al ₂ O ₃	7.77	8.07	7.95	8.09	7.03	7.92	7.36	8.24	7.42	8.12	7.68	8.09	8.48	8.91	8.46	8.78	8.33	8.75	8.62	GS4	GS4	GS4	GS4	GS4	GS5	GS5	GS5	GS5	GS5	GS6								
FeO	12.43	9.91	10.05	9.27	11.99	13.52	12.29	9.46	10.18	10.25	9.76	10.19	11.69	11.23	11.50	11.68	10.43	11.77	11.57	GS4	GS4	GS4	GS4	GS4	GS5	GS5	GS5	GS5	GS5	GS6								
Fe ₂ O ₃ *	2.70	6.53	6.21	6.65	3.04	3.50	3.85	7.14	5.54	6.24	6.31	6.09	5.13	6.08	6.14	5.33	5.86	4.63	5.46	GS4	GS4	GS4	GS4	GS4	GS5	GS5	GS5	GS5	GS5	GS6								
MnO	0.31	0.37	0.34	0.45	0.38	0.47	0.42	0.46	0.43	0.42	0.48	0.43	0.39	0.39	0.38	0.32	0.35	0.58	0.71	GS4	GS4	GS4	GS4	GS4	GS5	GS5	GS5	GS5	GS5	GS6								
MgO	12.56	12.43	12.19	12.33	12.65	11.39	11.95	12.13	12.97	12.57	12.94	12.57	11.41	11.43	11.84	11.29	12.21	11.03	11.71	GS4	GS4	GS4	GS4	GS4	GS5	GS5	GS5	GS5	GS5	GS6								
CaO	11.80	11.21	11.11	11.02	11.51	11.58	11.40	10.95	11.25	11.29	11.26	11.23	11.29	11.20	11.49	11.24	11.13	10.78	11.27	GS4	GS4	GS4	GS4	GS4	GS5	GS5	GS5	GS5	GS5	GS6								
Na ₂ O	1.44	1.37	1.29	1.31	1.43	1.50	1.47	1.47	1.54	1.56	1.60	1.52	1.46	1.51	1.54	1.29	1.48	1.70	1.61	GS4	GS4	GS4	GS4	GS4	GS5	GS5	GS5	GS5	GS5	GS6								
K ₂ O	0.89	0.92	0.88	0.83	0.91	1.05	0.89	0.98	0.87	0.89	0.87	0.88	1.00	1.03	0.99	1.04	1.06	1.07	1.02	GS4	GS4	GS4	GS4	GS4	GS5	GS5	GS5	GS5	GS5	GS6								
H ₂ O ^{расч}	1.68	1.89	1.82	1.79	1.74	1.69	1.70	1.77	1.79	1.87	1.77	1.86	1.74	1.73	1.81	1.73	1.71	1.75	1.79	GS4	GS4	GS4	GS4	GS4	GS5	GS5	GS5	GS5	GS5	GS6								
Cl	0.11	—	—	—	0.12	0.12	0.14	0.10	0.07	—	—	—	—	—	0.10	0.13	0.18	—	—	GS4	GS4	GS4	GS4	GS4	GS5	GS5	GS5	GS5	GS5	GS6								
Сумма	99.65	99.83	98.56	98.39	98.74	99.57	98.43	98.66	100.28	100.93	100.55	100.71	98.06	99.41	100.87	98.92	99.63	97.53	101.25	GS4	GS4	GS4	GS4	GS4	GS5	GS5	GS5	GS5	GS5	GS6								

Коэффициенты рассчитаны на C + T = 13 катионов																																									
Образец	GS1	GS1	GS1	GS1	GS2	GS2	GS2	GS2	GS2	GS3	GS3	GS3	GS3	GS3	GS3	GS3	GS3	GS3	GS3	GS3	GS3	GS3	GS3	GS3	GS3	GS3	GS3	GS3	GS3	GS3											
№ ан.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	GS3																					
Si	6.85	6.82	6.82	6.79	6.95	6.79	6.86	6.71	6.87	6.81	6.79	6.83	6.70	6.64	6.70	6.71	6.72	6.74	6.75	GS3																					
Al _I	1.15	1.18	1.18	1.21	1.05	1.21	1.14	1.29	1.13	1.19	1.21	1.17	1.30	1.36	1.30	1.29	1.28	1.26	1.25	GS3																					
Сумма _{Al}	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	GS3																					
Ti	0.17	0.07	0.09	0.11	0.14	0.16	0.15	0.12	0.13	0.09	0.14	0.10	0.12	0.14	0.11	0.14	0.16	0.11	0.13	GS3																					
Al	0.20	0.22	0.22	0.20	0.18	0.18	0.16	0.15	0.15	0.21	0.11	0.22	0.21	0.20	0.16	0.26	0.17	0.30	0.23	GS3																					
Fe ³⁺	0.30	0.72	0.69	0.74	0.34	0.39	0.43	0.80	0.61	0.68	0.69	0.67	0.58	0.68	0.68	0.60	0.65	0.53	0.60	GS3																					
Fe ²⁺	1.53	1.22	1.25	1.15	1.49	1.68	1.54	1.18	1.24	1.25	1.19	1.24	1.47	1.40	1.41	1.46	1.29	1.49	1.41	GS3																					
Mn	0.04	0.05	0.04	0.06	0.05	0.06	0.05	0.06	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.07	0.09	GS3																					
Mg	2.76	2.72	2.70	2.73	2.80	2.53	2.67	2.69	2.82	2.72	2.81	2.73	2.57	2.53	2.59	2.51	2.69	2.49	2.54	GS3																					
Сумма _{Fe}	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	GS3																					
Образец	GS1	GS1	GS1	GS1	GS2	GS2	GS2	GS2	GS2	GS3	GS3	GS3	GS3	GS3	GS3	GS3	GS3	GS3	GS3	GS3	GS3	GS3	GS3	GS3	GS3	GS3	GS3	GS3	GS3	GS3	GS3										
№ ан.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	GS3																					
Na _В	1.86	0.24	0.23	0.25	0.17	0.15	0.17	0.25	0.24	0.24	0.24	0.25	0.18	0.22	0.19	0.20	0.24	0.25	0.24	GS3																					
Ca _В	0.14	1.76	1.77	1.75	1.83	1.85	1.83	1.75	1.76	1.76	1.76	1.75	1.82	1.78	1.81	1.80	1.76	1.75	1.76	GS3																					
Сумма _{Ca}	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	GS3																					

Образец	GS1	GS1	GS1	GS1	GS2	GS2	GS2	GS2	GS3	GS3	GS3	GS3	GS3	GS4	GS4	GS4	GS5	GS5	GS6	GS6
№ ан.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
Na _A	0.27	0.15	0.14	0.13	0.24	0.28	0.26	0.17	0.20	0.20	0.21	0.18	0.25	0.22	0.25	0.17	0.18	0.25	0.21	
K _A	0.17	0.17	0.17	0.16	0.17	0.20	0.17	0.19	0.16	0.16	0.16	0.16	0.19	0.20	0.18	0.20	0.20	0.21	0.19	
Сумма _A	0.44	0.32	0.31	0.29	0.41	0.48	0.43	0.36	0.36	0.36	0.37	0.34	0.44	0.42	0.43	0.37	0.38	0.46	0.40	
(OH)	1.97	2.00	2.00	2.00	1.97	1.97	1.97	1.97	1.98	2.00	2.00	2.00	2.00	1.96	1.98	1.97	1.95	2.00	2.00	
Cl ⁻	0.03	—	—	—	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	—	—	—	—	0.04	0.02	0.03	0.05	—	—	
#Fe	0.40	0.42	0.42	0.41	0.40	0.45	0.42	0.42	0.40	0.42	0.40	0.41	0.44	0.45	0.45	0.45	0.42	0.45	0.44	
X(Fe ³⁺)	0.18	0.37	0.36	0.39	0.19	0.19	0.22	0.40	0.33	0.35	0.37	0.35	0.28	0.33	0.33	0.29	0.34	0.26	0.30	

Примечание. Прочерк – содержание элемента ниже предела обнаружения. H₂O_{расч.} – расчетное содержание конституционной воды. #Fe = (Fe²⁺ + Fe³⁺)/(Mg + Fe²⁺ + Fe³⁺), X(Fe³⁺) = Fe³⁺/(Fe³⁺ + Fe²⁺). Анализы 1, 5 и 6 из термобарометрических расчетов исключены вследствие низкого содержания Fe³⁺.

Note. Dash – the element content is below detection limit. H₂O_{расч.} is the calculated constitutional water content. #Fe = (Fe²⁺ + Fe³⁺)/(Mg + Fe²⁺ + Fe³⁺), X(Fe³⁺) = Fe³⁺/(Fe³⁺ + Fe²⁺). Analyses 6, 13, and 38 were excluded from thermobarometric studies due to low Fe³⁺ content.

Давление оценено по зависимости содержания Al (Al^{tot} = Al_T + Al_C) в роговой обманке и выражается минеральной реакцией (Hollister et al., 1987): ортоклаз + чермакит = 2 кварц + 2 анортит + биотит. При повышении давления равновесие смещается влево, вследствие чего в роговой обманке возрастает содержание Al. Итоги экспериментального изучения этой зависимости в гаплогранитной системе и калибровки геобарометра изложены в работах (Johnson, Rutherford, 1989; Anderson, 1996; Mutch et al., 2016). Уравнение Е. Матча с соавторами применимо в интервале 1–13 кбар; наши оценки по этому уравнению составляют 2–3 кбар с результирующей ошибкой ± 0.5 кбар (рис. 7А, табл. 3).

Изменение температуры, в свою очередь, отражается на равновесии (Holland, Blundy, 1994): эденит + 4 кварц = тремолит + альбит. Изучение процесса перераспределения Na между амфиболом и плагиоклазом позволило составить уравнение соответствующего геотермометра (Holland, Blundy, 1994), ошибка калибровки которого составляет ±30 °С. На основании химического состава амфиболов (табл. 2) и сосуществующих с ними полевых шпатов (табл. 4) температуры кристаллизации варьируют от 680 до 760 °С при итоговой погрешности ±50–70 °С (рис. 7, табл. 4).

Концентрация H₂O в расплаве оценена по пегмометру (Riddolfi et al., 2009). Для изученных образцов содержание H₂O составляет 3.5–4.5 мас. % (табл. 4). Ошибка определений составляет 0.4 мас. %.

Геобарометрия по химическому составу биотита. При исследовании интрузивных массивов Урала установлено, что в зависимости от глубины образования гранитоидов в биотите наиболее значительно изменяются содержания TiO₂ и Al₂O₃ (Ферштатер, 1987). Данная закономерность предложена для оценочного фациального анализа плутонов. Состав изученного биотита без включений акцессорных минералов (фторопатита, циркона, титаниста) из гранитоидов массива Южный (электронное приложение) попадает в поле мезоабиссальной фации (рис. 7Б).

Оценка общего и водного давления по микрографическим сростаниям кварца с полевыми шпатами. При кристаллизации остаточных гранитных расплавов (по составу близких гранитной котектике) формируются графические агрегаты, количество кварца в которых зависит от состава расплава (в т. ч. от содержания воды в нем). Такая зависимость изучена экспериментально (Tuttle, Bowen, 1958; James, Hamilton, 1969) и положена в основу методики опре-

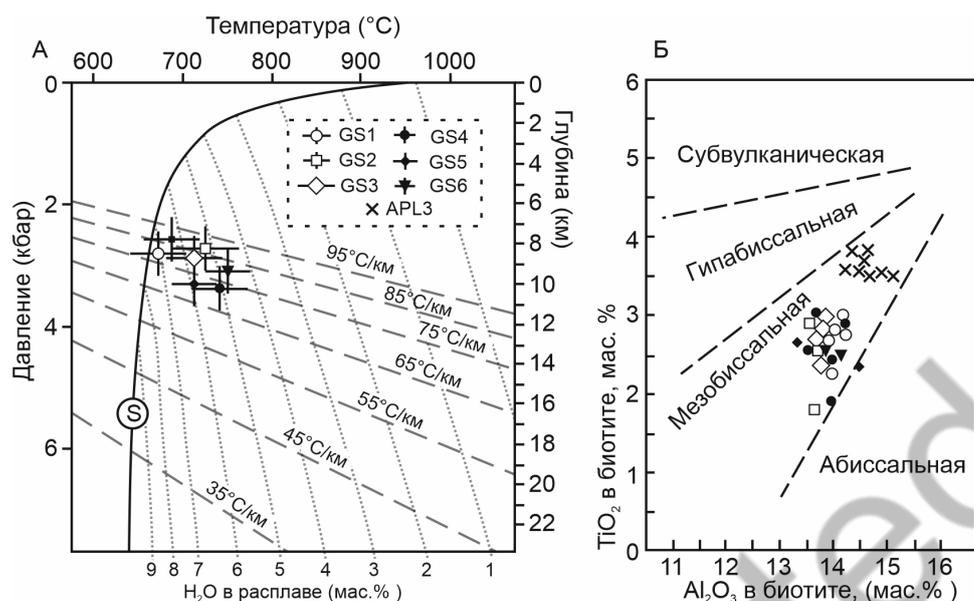


Рис. 7. Результаты геотермобарометрических расчетов: А – на основе парагенезиса амфибол-плагиоклаз в гранитоидах. Размах по вертикальной и горизонтальной осям у каждого знака показывает ошибку определения давления и температуры. Грубый пунктир – линии геотермического градиента; тонкий пунктир – линии ликвидуса с определенным содержанием воды в расплаве; S – линия водонасыщенного гранитного солидуса, по (Holtz, 2001); Б – глубина кристаллизации, оцененная по составу биотита с использованием диаграммы TiO₂–Al₂O₃, по (Ферштатер, 1987).

Fig. 7. Results of geothermobarometric calculations: A – based on the amphibole-plagioclase assemblage in granitoids. The vertical and horizontal lines near each symbol indicate the calculation error of pressure and temperature. Coarse dotted line – lines of geothermal gradient; fine dotted line – lines of liquidus with a certain water content in the melt; S – line of the water-saturated granitic solidus, after (Holtz, 2001); B – crystallization depth estimated from the composition of biotite on TiO₂–Al₂O₃ diagram, after (Ferstater, 1987).

деления P_{H_2O} (Ферштатер, 1987). Графические сростки нами наблюдались нами в аплитовидных лейкогранитах поздней жильной фазы (рис. 2Д, Е, 6).

Совместная кристаллизация кварца и полевых шпатов происходит в условиях равенства водного и общего давлений ($P_{H_2O} = P_{общ}$). Оценки давления по телам пегматитов могут быть завышены вследствие так называемого автоклавного эффекта, обусловленного избыточным давлением флюидной фазы. Влияние эффекта на микрографические сростания в аплитовидных гранитах значительно меньше (Ферштатер, 1987).

В породах жильной фазы наблюдались два типа кварц-полевошпатовых сростаний. В первом типе (рис. 6А, Б, В) преобладает калиевый полевой шпат, насыщенный многочисленными микропертитовыми вростками альбита-олигоклаза (An₉₋₁₁). Кварц здесь формирует Г-образные угловатые кристаллы размером 1–2 мм. В сростках второго типа (рис. 6Г) полевой шпат представлен олигоклазом; кварц закономерно обладает несколько меньшим размером зерен и присутствует в больших количествах. На основании количества кварца и состава

полевых шпатов давление при кристаллизации жильной фазы оценено приблизительно в 3 кбар (рис. 8, табл. 5).

Условия кристаллизации, оцениваемые по контактовым метаморфическим породам. Наблюдаемые в контактовом ореоле минеральные ассоциации (биотит-кварц-андалузит-кордиерит, роговая обманка-эпидот-биотит-андезин и др.), устойчивы при широких вариациях температур и давлений и не указывают на их конкретные значения. Исключительной является только ассоциация кордиерит + андалузит + ставролит + кварц (Беззубцев и др., 1979ф), которая наблюдалась нами в метаморфизованных глинистых отложениях нижнего кембрия (обр. HR1, рис. 9) в северном экзоконтакте плутона на расстоянии 500–1000 м от границы с ним (рис. 1). Согласно (Richardson, 1968; Yardley, 1989), данная ассоциация является нижней границей поля устойчивости ставролита в метапелитах и представляет собой моновариантное равновесие: кордиерит + 2 андалузит + 2H₂O = 2 ставролит + 3 кварц. Линия такой реакции в *PT*-координатах соответствует ограниченным условиям метаморфизма: 2–

Таблица 3. Оценки содержания воды в расплаве (H_2O^L), температуры (T), давления (P) и глубины (h) кристаллизации гранитоидов массива Южный на основе парных анализов равновесно сосуществующих амфиболов и плагиоклазов

Table 3. Estimated water content of melt (H_2O^L), temperature (T), pressure (P) and depth (h) of crystallization granitoid of the Yuzhny pluton based on amphibole-plagioclase thermobarometry

Образец	Амфиболы				Плагиоклазы				Результаты							
	№ ан.	Al^{tot} , к.а.ф.	$X(Si)^T$	$X(Al)^T$	$X(Al)^{M2}$	$X(Na)^A$	$X(Na)^{M4}$	$X(Ca)^{M4}$	$X(K)^A$	$X(\square)^A$	№ ан.	X_{ab}	H_2O^L , мас. %	T , °C	P , кбар	h , км
GS1	2	1.40	0.71	0.30	0.11	0.15	0.12	0.88	0.17	0.68	2	0.77	4.4	690	2.9	7-10
	3	1.40	0.71	0.30	0.11	0.13	0.12	0.89	0.17	0.70	3	0.77	4.4	680	2.9	7-10
	4	1.41	0.70	0.30	0.10	0.12	0.13	0.88	0.16	0.72	4	0.78	4.5	680	2.9	7-10
	7	1.30	0.72	0.29	0.08	0.27	0.08	0.92	0.17	0.56	7	0.72	3.5	740	2.6	6-9
GS3	8	1.44	0.68	0.32	0.08	0.17	0.13	0.88	0.19	0.64	8	0.8	3.9	720	3.0	8-11
	9	1.28	0.72	0.28	0.08	0.20	0.12	0.88	0.16	0.64	9	0.78	3.6	720	2.6	6-9
	10	1.40	0.70	0.30	0.11	0.20	0.12	0.88	0.16	0.64	10	0.79	4.3	710	2.9	7-10
	11	1.32	0.70	0.30	0.05	0.21	0.12	0.88	0.16	0.63	11	0.79	3.6	740	2.7	7-10
	12	1.39	0.71	0.29	0.11	0.19	0.12	0.88	0.16	0.65	12	0.79	4.3	700	2.9	7-10
GS4	13	1.51	0.68	0.33	0.11	0.25	0.09	0.91	0.19	0.56	13	0.71	4.1	740	3.3	8-11
	14	1.56	0.66	0.34	0.10	0.22	0.11	0.89	0.20	0.58	14	0.71	4.2	750	3.4	9-12
	15	1.46	0.68	0.33	0.08	0.25	0.10	0.91	0.18	0.57	15	0.71	4.0	760	3.1	8-11
GS5	16	1.55	0.68	0.32	0.13	0.17	0.10	0.90	0.20	0.63	16	0.71	4.5	710	3.4	9-12
	17	1.45	0.68	0.32	0.09	0.18	0.12	0.88	0.20	0.62	17	0.72	3.7	730	3.1	8-11
GS6	18	1.56	0.69	0.32	0.15	0.24	0.13	0.88	0.21	0.55	18	0.79	4.2	690	3.4	9-12
	19	1.48	0.69	0.31	0.12	0.21	0.12	0.88	0.19	0.60	19	0.81	4.2	700	3.2	8-11

Примечание. Коэффициенты $X(Si)^T$, $X(Al)^T$, $X(Al)^{M2}$, $X(Al)^{M4}$, $X(Na)^A$, $X(Na)^{M4}$, $X(Ca)^{M4}$, $X(K)^A$, $X(\square)^A$ и X_{ab} и расчет T согласно работе (Holland, Blundy, 1994). Содержание H_2O^L оценено по гигрометру (Riddolfi et al., 2009), P – по геобарометру (Mutch et al., 2016).

Note. Coefficients $X(Si)^T$, $X(Al)^T$, $X(Al)^{M2}$, $X(Al)^{M4}$, $X(Na)^A$, $X(Na)^{M4}$, $X(Ca)^{M4}$, $X(K)^A$, $X(\square)^A$ and X_{ab} and T value are calculated after (Holland, Blundy, 1994). The H_2O^L content and P value are estimated after (Riddolfi et al., 2009) and (Mutch et al., 2016), respectively.

Таблица 4. Химический состав (мас. %) и кристаллохимические формулы Na-Ca полевых шпатов массива Южный, равновесно сосуществующих с амфиболами

Table 4. Chemical composition (wt. %) and atoms per formula units of Na-Ca feldspars of the Yuzhny pluton equilibrated with amphiboles

Образец	№ ан.	Содержание, мас. %						Кристаллохимическая формула
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма	
GS1	1	62.34	23.91	4.45	8.99	0.17	99.86	(Na ₇₇ Ca ₂₁ K ₁) ₉₉ [(Si ₂₇₆ Al ₁₂₅) ₄₀₁ O ₈₀₀]
	2	62.42	23.89	4.26	9.01	0.20	99.78	(Na ₇₇ Ca ₂₀ K ₁) ₉₈ [(Si ₂₇₇ Al ₁₂₅) ₄₀₂ O ₈₀₀]
	3	62.40	23.82	4.26	9.01	0.20	99.69	(Na ₇₇ Ca ₂₀ K ₁) ₉₈ [(Si ₂₇₇ Al ₁₂₅) ₄₀₃ O ₈₀₀]
	4	62.41	23.82	4.25	9.12	0.19	99.79	(Na ₇₈ Ca ₂₀ K ₁) ₉₉ [(Si ₂₇₇ Al ₁₂₄) ₄₀₁ O ₈₀₀]
GS2	5	62.37	23.87	4.26	9.00	0.20	99.71	(Na ₇₅ Ca ₂₃ K ₁) ₉₉ [(Si ₂₇₇ Al ₁₂₃) ₄₀₀ O ₈₀₀]
	6	62.00	23.85	5.25	8.35	0.18	99.63	(Na ₇₂ Ca ₂₅ K ₁) ₉₈ [(Si ₂₇₆ Al ₁₂₅) ₄₀₁ O ₈₀₀]
	7	62.12	23.81	5.24	8.34	0.18	99.69	(Na ₇₂ Ca ₂₅ K ₁) ₉₈ [(Si ₂₇₇ Al ₁₂₅) ₄₀₂ O ₈₀₀]
GS3	8	63.19	23.23	3.90	9.31	0.20	99.84	(Na ₈₀ Ca ₁₉ K ₁) ₁₀₀ [(Si ₂₈₀ Al ₁₂₁) ₄₀₁ O ₈₀₀]
	9	62.44	23.18	4.05	9.05	0.22	98.95	(Na ₇₈ Ca ₁₉ K ₁) ₉₈ [(Si ₂₇₉ Al ₁₂₂) ₄₀₁ O ₈₀₀]
	10	63.75	22.28	3.82	9.12	0.18	99.15	(Na ₇₉ Ca ₁₈ K ₁) ₉₈ [(Si ₂₈₃ Al ₁₁₇) ₄₀₀ O ₈₀₀]
	11	63.85	22.32	3.82	9.14	0.18	99.31	(Na ₇₉ Ca ₂₀ K ₁) ₁₀₀ [(Si ₂₇₈ Al ₁₂₃) ₄₀₁ O ₈₀₀]
	12	62.38	23.53	4.00	9.19	0.18	99.27	(Na ₇₉ Ca ₁₉ K ₁) ₉₉ [(Si ₂₇₇ Al ₁₂₃) ₄₀₀ O ₈₀₀]
GS4	13	61.74	24.44	5.22	8.21	0.15	99.76	(Na ₇₁ Ca ₂₅ K ₁) ₉₇ [(Si ₂₇₄ Al ₁₂₈) ₄₀₂ O ₈₀₀]
	14	61.57	24.19	5.13	8.28	0.24	99.41	(Na ₇₁ Ca ₂₄ K ₁) ₉₆ [(Si ₂₇₄ Al ₁₂₇) ₄₀₁ O ₈₀₀]
	15	61.72	24.49	5.15	8.30	0.13	99.79	(Na ₇₁ Ca ₂₄ K ₁) ₉₆ [(Si ₂₇₃ Al ₁₂₈) ₄₀₁ O ₈₀₀]
GS5	16	61.23	24.19	5.45	8.22	0.18	99.27	(Na ₇₁ Ca ₂₆ K ₁) ₉₈ [(Si ₂₇₃ Al ₁₂₇) ₄₀₀ O ₈₀₀]
	17	61.07	24.32	5.44	8.32	0.18	99.32	(Na ₇₂ Ca ₂₆ K ₁) ₉₉ [(Si ₂₇₃ Al ₁₂₈) ₄₀₁ O ₈₀₀]
GS6	18	62.65	23.73	4.05	9.88	0.14	100.44	(Na ₇₉ Ca ₁₉ K ₁) ₁₀₀ [(Si ₂₇₇ Al ₁₂₃) ₄₀₀ O ₈₀₀]
	19	62.12	24.46	3.81	9.48	0.18	100.05	(Na ₈₁ Ca ₁₈ K ₁) ₁₀₀ [(Si ₂₇₄ Al ₁₂₇) ₄₀₁ O ₈₀₀]

Примечание. Коэффициенты в формулах рассчитаны на 16 зарядов.

Note. Atoms per formula units are calculated for 16 charges.

3 кбар и 520–620 °С (рис. 10). Она приблизительно характеризует условия во время застывания расплава главной фазы.

ОБСУЖДЕНИЕ

Данные об условиях кристаллизации гранитоидов позволяют, во-первых, определить глубину массива (во время образования главной и жильной фаз внедрения) и, во-вторых, оценить их металлогенический потенциал.

Условия кристаллизации гранитоидов. Согласно результатам амфибол-плаггиоклазовой геотермобарометрии (рис. 7А, табл. 4), кристаллизация магмы происходила при относительно низких температурах в 680–760 °С, давлении в 2.8–3.4 кбар (что соответствует глубинам от 7 до 11 км) и низких содержаниях H₂O в расплаве (3.5–4.5 мас.

%). Содержания TiO₂ и Al₂O₃ в биотите характерны для мезоабиссальной фации глубинности (рис. 7Б). Особенности строения кварц-полевошпатовых графических сростаний (содержание кварца и химический состав сопряженного полевого шпата) в жильных лейкогранитах указывают на величины давления около 3 кбар (рис. 8, табл. 5).

В контактовых роговиках наиболее информативной оказывается ассоциация кордиерит + андалузит + кварц + ставролит (рис. 9), которая представляет собой моновариантное равновесие с определенным положением в *PT*-координатах (рис. 10). Глубинное размещение метapelитов и, следовательно, оформленного к тому времени плутона можно оценить в 6–9 км, если величину давления разделить на геобарический градиент, приблизительно равный 0.3 кбар/км (Pitcher, 1997). Поскольку образование массива связано с постколлизийным этапом магматизма на Таймыре (Vernikovskiy,

Таблица 5. Оценка давления и глубины кристаллизации жильных лейкогранитов массива Южный

Table 5. Pressure and depth estimation of leucogranites of the Yuzhny pluton

Образец	Тип срastания	An в полевом шпате, %	Qz, %	n	P, кбар	h, км
APL1	Кварц-олигоклазовые	10	42.5±3.0	4	3	8-11
APL2	Кварц калишпатовые	2	32.5 ± 2.1	8	3	8-11
APL3		0	32.4 ± 2.9	9	3	8-11

Примечание. Методика барометрии изложена в работе (Ферштатер, 1987).

Note. Barometry methodology according to (Fershtater, 1987).

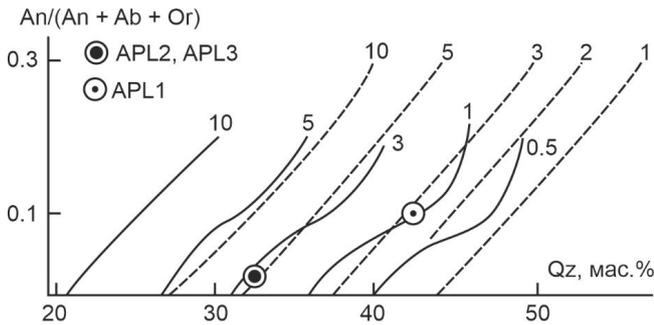


Рис. 8. Оценка давления по количеству кварца (Qz) в графических агрегатах и соотношению между анортитом (An), альбитом (Ab) и калиевого полевым шпатом (Or) на диаграмме по (Ферштатер, 1987).

Сплошные и пунктирные линии – изобары в системах Qz-Ab-An (применимо для образцов APL2 и APL3) и Qz-Ab-An (применимо для образца APL1), соответственно.

Fig. 8. Estimated pressure from the amount of quartz (Qz) in graphic aggregates and a ratio between anorthite (An), albite (Ab) and K-feldspar (Or) on diagram after (Fershtater, 1987). Solid and dotted lines – isobars in the Qz-Ab-An (applicable for APL2 and APL3 samples) and Qz-Ab-An (applicable for the APL1 sample) systems, respectively. Numerical signatures are pressure values.

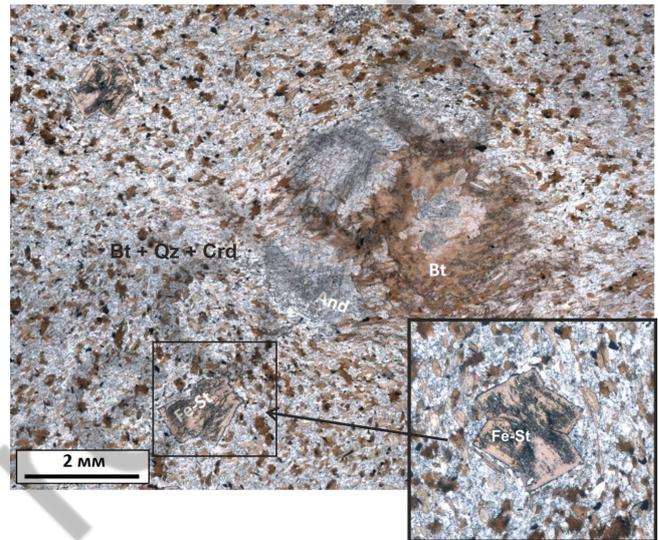


Рис. 9. Парагенезис кордиерита (Crd), андалузита (And), кварца, биотита и ставролита (St) в метапелите (образец HR1) в контактовом ореоле массива Южный.

Шлиф, фото без анализатора.

Fig. 9. Assemblage of cordierite (Crd), andalusite (And), quartz, biotite and staurolite (St) in metapelite (sample HR1) at the contact halo of the Yuzhny pluton.

Thin section, without analyzer.

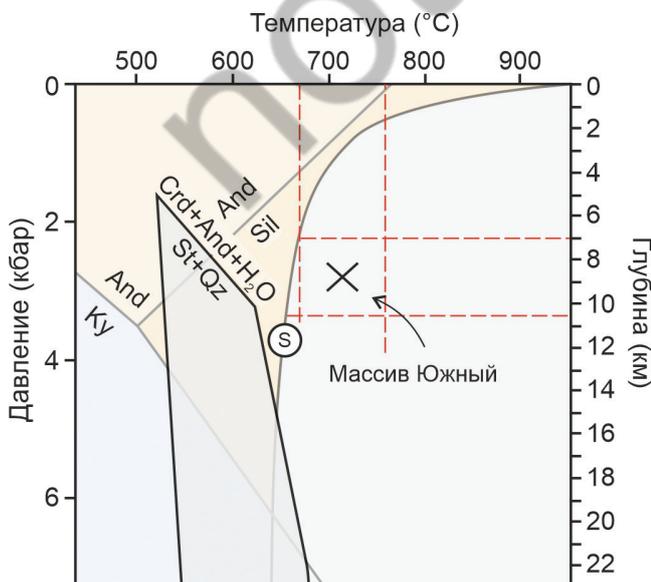


Рис. 10. Оценка глубины кристаллизации массива Южный по данным геотермобарометрии амфибол-плагиоклаз и кварц-полевые шпаты и характеристика контактового метаморфизма.

Поле устойчивости ставролита в метапелитах по данным (Richardson, 1968; Yardley, 1989); S – солидус водонасыщенного гранитного расплава; Ky – кyanит; And – андалузит; Sil – силлиманит.

Fig. 10. Estimation of crystallization depth of the Yuzhny pluton based on amphibole-plagioclase and quartz-feldspar geothermobarometry and characteristics of contact metamorphism.

Stability field of staurolite in metapelites is after (Richardson, 1968; Yardley, 1989); S – solidus of water-saturated granite melt; Ky – kyanite; And – andalusite; Sil – sillimanite.

2020), внедрение расплавов происходило в обстановке растяжения, и давление при контактовом метаморфизме определялось в существенной степени лишь только нагрузкой вышележащих толщ. Контактный метаморфизм при P до 2–3 кбар свойственен для гранитных батолитов (Ревердатто, 1970).

Становление батолита в условиях мезоабиссальной фации глубинности, таким образом, представляется реалистичным. Установленные PT -параметры характерны для зоны магматической ассимиляции вмещающих пород (Кузнецов и др., 1973). Действительно, в гранитоидах наблюдается несколько признаков этого процесса: в краевых зонах интрузива широко развиты шпирь меланократовых (амфиболовых, амфибол-биотитовых) монцогаббро и габбродииоритов (рис. 2Г), присутствуют ксенолиты ороговикованных вмещающих пород (рис. 2В) и более темноцветные интрузивные породы тяготеют к границе тела (согласно маршрутным наблюдениям так называемые «зоны закалки»).

Оценка металлогенического потенциала гранитоидов. Вследствие особенностей условий образования изученные гранитоиды, по всей видимости, обладают низкой рудоносностью. Считается, что на глубинах от 16 до 4 км кристаллизуются преимущественно безрудные граниты, которые образуются из относительно маловодных расплавов (3–4 мас. % H_2O) по сравнению с более глубинными расплавами мусковитсодержащих гранитов (7–8 мас. % H_2O) (Strong, 1981). В последних изначально высокая флюидонасыщенность нарастает по мере фракционной кристаллизации безводных полевых шпатов и кварца и оказывается достаточной для формирования магматогенного флюида и образования пегматитовых и гидротермальных альбитит-грейзеновых месторождений.

Застывая на значительной глубине, гранитоиды массива явно не достигли уровня грунтовых вод. Порфиновые и эпитегрмальные месторождения, хотя и связаны с весьма «сухими» расплавами (содержащими менее 3–4 мас. % H_2O), формируются в существенной степени за счет внешних приповерхностных источников воды, таких как метеорные осадки, морские и пластовые воды (Strong, 1981; Жариков, Русинов, 1998).

Металлогения подобных батолитов монцонит-гранитного состава ограничена небольшими скарновыми месторождениями W-Mo и Cu без существенного промышленного значения (Кузнецов, 1964; Изох, 1978). Подчеркнем, что в аллювии рек и ручьев, протекающих на площади изученного мас-

сива и его экзоконтакта, в шлихах определен шеелит (Качурина и др., 2013). Видимо, источником шеелита служит именно контактовый ореол массива.

Нельзя, тем не менее, исключать обнаружение на площади массива более поздней минерализации молибден-медно-порфирового типа. На северо-восточном Таймыре такой рудоносностью характеризуется пекинский гранит-граносиенитовый гипабиссальный комплекс поздней перми-триаса. Он обуславливает развитие минерализации, например, на Широкинском, Пекинском и Трёхсестерском рудных узлах (Берзон и др., 2021; Проскурнин и др., 2021; Берзин и др., 2024).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании минералогических особенностей контактового метаморфизма, минеральной геотеробарометрии (парагенезис амфибол-плагиоклаз), изучения эвтектических кварц-полевошпатовых графических агрегатов гранитоиды массива Южный (северо-восточный Таймыр) наиболее вероятно кристаллизовались в условиях мезоабиссальной фации из маловодной магмы на глубинах 7–11 км, не достигая приповерхностных источников воды, вследствие чего самостоятельное металлогеническое значение массива невелико и, вероятно, ограничено лишь малыми проявлениями скарнов. Однако массив может вмещать более поздние гипабиссальные тела гранитов-граносиенитов, рудоносных в отношении Cu и Mo.

ЛИТЕРАТУРА

Баклунд О.О. (1929) Кристаллические породы северного побережья Сибири, ч. II-я. Кристаллические породы Таймыра. *Записки Академии Наук СССР по отделению физико-математических наук*, серия VIII, т. XXI, № 7.

Беззубцев В.В., Гончаров Ю.И., Залялеев Р.Ш. (1979ф) Геологическое строение и полезные ископаемые Таймырской складчатой области. Отчет Таймырской опытнопроизводственной партии по результатам аэрофотогеологического картирования масштаба 1: 200 000 Таймырской складчатой области в 1972–1979 гг. Красноярск, СНИИГГиМС.

Берзин С.В., Петров С.В., Конопелько Д.Л., Курапов М.Ю., Головина Т.А., Черненко Н.Я., Червяковский В.С. (2024) Использование состава циркона и апатита при прогнозировании Cu-Mo-Au порфиروهоруденения в Пекинском и Тесемском массивах Таймыро-Североземельской складчатой области. *Ли-*

мосфера, 24 (23), 547–565. <http://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-3-547-565>

Берзон Е.И., Проскурнин В.Ф., Черненко Н.Я., Мальцева С.В. (2021) Перспективы выявления медно-порфировых месторождений на полуострове Челюскин. *Геологический вестник УК Полиметалл*, 9, 4–16.

Верниковский В.А. (1996) Геодинамическая эволюция Таймырской складчатой области. Новосибирск, НИЦ ОИГГМ СО РАН, 202 с.

Дворцов Н.В., Проскурнин В.Ф., Багаева А.А., Березюк Н.И., Берзон Е.И., Курапов М.Ю., Шнейдер А.Г., Кисельников Ю.В. (2025) Новые данные по позднепалеозойским и раннемезозойским гранитоидам северо-восточного Таймыра. *Материалы XIV петрографического совещания «Петрология и геодинамика геологических процессов: роль в изучении недр и геологическом картографировании»*. СПб, Институт Карпинского, 71–73.

Жариков В.А., Русинов В.Л. (1998) Метасоматизм и метасоматические породы. М., Научный мир, 492 с.

Изох Э.П. (1978) Оценка рудоносности гранитоидных формаций в целях прогнозирования. М., Недр, 136 с.

Качурина Н.В., Макарьев А.А., Макарьева Е.М., Гавриш А.В., Орлов В.В., Сахаров А.А., Дымов В.А., Козлов С.А. (2013) Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение) Серии Северо-Карско-Баренцевоморская и Таймырско-Североземельская. Лист Т-45-48 – м. Челюскин. Объяснительная записка. СПб, Картфабрика ВСЕГЕИ, 568 с.

Кисельников Ю.В., Шнейдер А.Г., Проскурнин В.Ф. (2026) Условия метаморфизма вмещающих пород Борзовского золотрудного узла (Северо-Восточный Таймыр). *Геология и Геофизика*, <http://doi.org/10.15372/GIG2025178>

Кривовичев В.Г., Гульбин Ю.Л. (2022) Рекомендации по расчету и представлению формул минералов по данным химических анализов. *Записки РМО*, 151 (1), 114–124, <http://doi.org/10.31857/S0869605522010087>

Кузнецов Ю.А. (1964) Главные типы магматических формаций. М., Недр, 387 с.

Кузнецов Ю.А., Шарапов В.Н., Меламед В.Г. (1973) О магматических фациях глубинности. *Геология и геофизика*, 7 (14), 3–17.

Махлаев Л.В., Коробова Н.И. (1972) Генетические гранитоидные ряды докембрия Таймыра (метаморфизм, ультраметаморфизм, гранитообразование). Труды СНИИГГиМС, 123, 158 с.

Лазарев Ф.Д., Кошевой В.В., Петров Ю.М., Уклеин В.Н., Альтшулер М.И. (1997ф) Комплексная аэрогеофизическая съемка на Северном Таймыре. Норильск, ЦАГРЭ, 260 с.

Падерин П.Г., Ахмадеев Ю.Г., Березюк Н.И., Попов В.Ю., Проскурнин В.Ф., Уклеин В.Н. (2005ф) Геологическая карта листа Т-48-XXXI, XXXII, XXXIII масштаба 1 : 200 000 (устье р. Ленинградская). Объяснительная записка. СПб, картфабрика ВСЕГЕИ, 59 с.

Проскурнин В.Ф. (2013) Минерагенический анализ Таймыро-Североземельского региона и оценка его золотоносного потенциала. *Дисс. на соиск. степ. докт. геол.-минерал. наук*. СПб, ВСЕГЕИ, 320 с.

Проскурнин В.Ф., Петров О.В., Романов А.П., Курбатов И.И., Гавриш А.В., Проскурнина М.А. (2021) Центрально-арктический золотосодержащий медно-молибден-порфировый пояс. *Региональная геология и металлогения*, 21, 31–49, http://doi.org/10.52349/08697892_2021_85_31_49

Равич М.Г., Чайка Л.А. (1962) Метаморфические и магматические формации Таймырского докембрия / Петрография Восточной Сибири. М., АН СССР, 2, 590–719.

Ревердатто В.В. (1970) Типы контактового метаморфизма. *Геология и геофизика*, 7, 33–38.

Соболев Н.В. (1964) Парагенетические типы гранатов. М., Наука, 220 с.

Урванцев Н.Н. (1931) Таймырская геологическая экспедиция 1929 г. *Труды главного геолога-разведывательного управления*, № 65, 40 с.

Ферштатер Г.Б. (1987) Петрология главных интрузивных ассоциаций. М., Наука, 231 с.

Шарпенюк Л.Н., Костин А.Е., Кухаренко Е.А. (2013) TAS-диаграмма сумма щелочей – кремнезем для химической классификации и диагностики плутонических пород. *Региональная геология и металлогения*, 56, 40–50.

Anderson J.L. (1996) Status of thermobarometry in granitic batholiths. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 87, 125–138.

Anderson J.L., Smith D.R. (1995) The effects of temperature and fO_2 on the Al-in-hornblende barometer. *American Mineralogist*, 80, 549–559, <http://doi.org/10.2138/am-1995-5-614>

Holland T., Blundy J. (1994) Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 116, 433–447. <https://doi.org/10.1007/BF00310910>

Hollister L., Grissom G., Peters E., Stowell H., Sisson V. (1987) Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline pluton. *American Mineralogist*, 72, 231–239.

Holtz F., Johannes W., Tamic N., Behrens H. (2001) Maximum and minimum water contents of granitic melts generated in the crust: a reevaluation and implications. *Lithos*, 56, 1–14, [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00056-6](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00056-6)

James R.S., Hamilton D.L. (1969) Phase relations in the system $NaAlSi_3O_8 - KAlSi_3O_8 - CaAl_2Si_2O_8 - SiO_2$ at 1 kilobar water vapour pressure. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 21, 111–141. <https://doi.org/10.1007/BF00403341>

Johnson M., Rutherford M. (1989) Experimental calibration of the aluminum-in-hornblende geobarometer with application to Long Valley caldera (California) volcanic

rocks. *Geology*, 17, 837–841. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1989\)017<0837:ECOTAI>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1989)017<0837:ECOTAI>2.3.CO;2)

Khudoley A.K., Verzhbitsky V.E., Zastrozhnov D.A., O'Sullivan P., Ershova V.B., Proskurnin V.F., Tuchkova M.I., Rogov M.A., Kyser T.K., Malyshev S.V., Schneider G.V. (2018) Late Paleozoic–Mesozoic tectonic evolution of the Easter Taimyr–Severnaya Zemlya fold and thrust belt and adjoining Yenisey-Khatanga depression. *Journal of Geodynamics*, 119, 221–241, <https://doi.org/doi: 10.1016/j.jog.2018.02.002>

Mutch E.J., Blundy J.D., Tattich B.C., Cooper G.J., Brooker R.A. (2016) An experimental study of amphibole stability in low-pressure granitic magmas and a revised Al-in-hornblende geobarometer. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 171, article #85, <https://doi.org/10.1007/s00410-016-1298-9>

Pitcher W.S. (1997) The nature and origin of granite. Springer Science & Business Media, 402 p.

Richardson S.W. (1968) Staurolite stability in a part of the system Fe–Al–Si–O–H. *Journal of Petrology*, 9, 467–488. <https://doi.org/10.1093/petrology/9.3.467>

Riddolfi F., Renzulli A., Puerini M. (2009) Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: an overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 160, 45–66, <https://doi.org/10.1007/s00410-009-0465-7>

Strong D.F. (1981) Ore deposit models: 5. A model for granophile mineral deposits. *Geoscience Canada*, 8 (4), 155–161.

Tuttle O.F., Bowen N.L. (1958) Origin of granite in the light of experimental studies in the system NaAlSi₃O₈–KAlSi₃O₈–SiO₂–H₂O. *Memoirs of the Geological Society of America*, 74, 153.

Vernikovskiy V.A., Vernikovskaya A.E., Proskurnin V.F., Matushkin N.Y., Proskurnina M.A., Kadilnikov P., Larionov A.N., Travin A.V. (2020) Late Paleozoic–Early Mesozoic granite magmatism on the Arctic margin of the Siberian Craton during the Kara–Siberia oblique collision and plume events. *Minerals*, 10, 571–611, <https://doi.org/10.3390/min10060571>

Yardley B.W.D. (1989) An introduction to metamorphic petrology. Longman Group UK Ltd, 132 p.

REFERENCES

Anderson J.L. (1996) Status of thermobarometry in granitic batholiths. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 87, 125–138.

Anderson J.L., Smith D.R. (1995) The effects of temperature and fO_2 on the Al-in-hornblende barometer. *American Mineralogist*, 80, 549–559, <http://doi.org/10.2138/am-1995-5-614>

Backlund O.O. (1929) Crystalline rocks of the northern coast of Siberia, pt. II. Crystalline rocks of Taimyr. *Zapisky*

Akademii nauk SSSR po otdeleniyu fiziko-matematicheskikh nauk (Proceedings of Academy of Sciences of the USSR of Physico-Mathematic Sciences), series VIII, vol. XXI, 7 (in Russian)

Berzin S.V., Konopelko D.L., Petrov S.V., Kurapov M.Yu., Golovina T.A., Chernenko N.Ya., Chervyakovskiy V.S. (2024) Utilizing compositions of zircon and apatite for prospecting of Cu–Mo–Au–porphyry mineralization in the Pekinsky and Tessemsky granitoid massifs of the Taimyr-Severozemelskaya folded area. *Litosfera (Lithosphere)*, 24(3), 547–565 (in Russian), <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-3-547-565>

Berzon E.I., Proskurnin V.F., Chernenko N.Ya., Maltseva S.V. (2021) Prospects for the finding of porphyry Cu deposits on the Chelyuskin Peninsula. *Geologicheskii vestnik UK Polimetall (Geological Bulletin of Management Company Polymetal)*, 9, 4–16 (in Russian)

Bezzubtsev V. V., Goncharov Yu. I., Zalyaleev R. Sh. (1979) Geological structure and mineral resources of the Taimyr folded region. Unpublished report of the Taimyr experimental production party based on the results of 1 : 200000 scale aerial photogeological mapping of the Taimyr folded region in 1972–1979. Krasnoyarsk, SNIIGGiMS (in Russian)

Dvortsov N.V., Proskurnin V.F., Bagaeva A.A., Berezyuk N.I., Berzon E.I., Kurapov M.Yu., Schneider A.G., Kiselnikov Yu.V. (2025) New data on the Late Paleozoic and Early Mesozoic granitoids of Northeast Taimyr. *Materialy XIV petrograficheskogo soveshchaniya «Petrologiya i geodinamika geologicheskikh protsessov: rol v izuchenii nedr i geologicheskoy kartografirovaniy» (Proceedings of the XIV Petrographic Conference “Petrology and Geodynamics of Geological Processes: a Role in Study of the Earth's Interiors and Geological Mapping”)*. St. Petersburg, Institut Karpinskogo, 71–73 (in Russian).

Fershtater G.B. (1987) Petrology of main intrusive associations. Moscow, Nauka, 231 p. (in Russian).

Holland T., Blundy J. (1994) Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 116, 433–447. <https://doi.org/10.1007/BF00310910>

Hollister L., Grissom G., Peters E., Stowell H., Sisson V. (1987) Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline pluton. *American Mineralogist*, 72, 231–239.

Holtz F., Johannes W., Tamic N., Behrens H. (2001) Maximum and minimum water contents of granitic melts generated in the crust: a reevaluation and implications. *Lithos*, 56, 1–14, [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00056-6](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00056-6)

Izokh E.P. (1978) Assessment of ore potential of granitoid complexes for the forecasting. Moscow, Nedra, 136 p. (in Russian)

James R.S., Hamilton D.L. (1969) Phase relations in the system NaAlSi₃O₈ – KAlSi₃O₈ – CaAl₂Si₂O₈–SiO₂ at 1 kilobar water vapour pressure. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 21, 111–141. <https://doi.org/10.1007/BF00403341>

- Johnson M., Rutherford M. (1989) Experimental calibration of the aluminum-in-hornblende geobarometer with application to Long Valley caldera (California) volcanic rocks. *Geology*, 17, 837–841. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1989\)017<0837:ECOTAI>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1989)017<0837:ECOTAI>2.3.CO;2)
- Kachurina N.V., Makariev A.A., Makarieva E.M., Gavrish A.V., Orlov V.V., Sakharov A.A., Dymov V.A., Kozlov S.A. (2013) State Geological Map of the Russian Federation. Scale of 1 : 1000000 (third generation) The North Kara-Barents Sea and Taimyr-North Zemlya series. Sheet T-45-48 – Cape Chelyuskin. Explanatory note. St. Petersburg, Kartfabrika VSEGEI, 568 p. (in Russian).
- Kiselnikov Yu.V., Shneider A.G., Proskurnin V.F. (2026) Metamorphic conditions of host rocks of the Borzova river gold cluster (Northeast Taimyr). *Russian Geology and Geophysics*, <http://doi.org/10.15372/GIG2025178>
- Khudoley A.K., Verzhbitsky V.E., Zastrozhnov D.A., O'Sullivan P., Ershova V.B., Proskurnin V.F., Tuchkova M.I., Rogov M.A., Kyser T.K., Malyshev S.V., Schneider G.V. (2018) Late Paleozoic–Mesozoic tectonic evolution of the Easter Taimyr–Severnaya Zemlya fold and thrust belt and adjoining Yenisey–Khatanga depression. *Journal of Geodynamics*, 119, 221–241, <https://doi.org/doi: 10.1016/j.jog.2018.02.002>
- Krivovichev V.G., Gulbin Yu.L. (2022) Recommendations for the calculation and presentation of mineral formulas based on chemical analysis data. *Zapiski RMO (Proceedings of the Russian Mineralogical Society)*, 151(1), 114–124 (in Russian), <http://doi.org/10.31857/S0869605522010087>
- Kuznetsov Yu.A. (1964) Main types of igneous complexes. Moscow, Nedra, 387 p. (in Russian).
- Kuznetsov Yu.A., Sharapov V.N., Melamed V.G. (1973) About deep igneous facies. *Geologiya i geofizika (Geology and Geophysics)*, 7 (14), 3–17 (in Russian).
- Lazarev F.D., Koshevoy V.V., Petrov Yu.M., Uklein V.N., Altshuler M.I. (1997) Integrated aerogeophysical survey of North Taimyr. Norilsk, TsAGRE, 260 p. (in Russian).
- Makhlaev L.V., Korobova N.I. (1972) Genetic granitoid series of the pre-Cambrian Taimyr (metamorphism, ultrametamorphism, granite formation). *Trudy SNIIGGiMS (Proceedings of SNIIGGiMS)*, 123, 158 p. (in Russian)
- Mutch E.J., Blundy J.D., Tattich B.C., Cooper G.J., Brooker R.A. (2016) An experimental study of amphibole stability in low-pressure granitic magmas and a revised Al-in-hornblende geobarometer. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 171, article #85, <https://doi.org/10.1007/s00410-016-1298-9>
- Paderin P.G., Akhmadeev Yu.G., Berezyuk N.I., Popov V.Yu., Proskurnin V.F., Uklein V.N. (2005) Geological map T-48-XXXI, XXXII, XXXIII on a scale of 1 : 200000 (mouth of the Leningradskaya River). Explanatory note. St. Petersburg, Kartfabrika VSEGEI, 59 p. (in Russian)
- Pitcher W.S. (1997) The nature and origin of granite. Springer Science & Business Media, 402 p
- Proskurnin V.F. (2013) Mineragenic analysis of the Taimyr-Severnaya Zemlya region and assessment of its gold-bearing potential. *Dissertation of Doctor Geol.-Mineral. Sci.* St. Petersburg, VSEGEI, 320 p. (in Russian)
- Proskurnin V.F., Petrov O.V., Romanov A.P., Kurbatov I.I., Gavrish A.V., Proskurnina M.A. (2021) Central Arctic gold-bearing porphyry Cu–Mo belt. *Regionalnaya geologiya i metallogeniya (Regional Geology and Metallogeny)*, 21, 31–49 (in Russian), http://doi.org/10.52349/08697892_2021_85_31_49
- Ravich M.G., Chaika L.A. (1962) Metamorphic and igneous complexes of the Taimyr Precambrian / In: Petrography of Eastern Siberia. Moscow, AN SSSR, 2, 590–719 (in Russian)
- Reverdatto V.V. (1970) Types of contact metamorphism. *Geologiya i geofizika (Geology and Geophysics)*, 7, 33–38 (in Russian)
- Richardson S.W. (1968) Staurolite stability in a part of the system Fe–Al–Si–O–H. *Journal of Petrology*, 9, 467–488. <https://doi.org/10.1093/petrology/9.3.467>
- Riddolfi F., Renzulli A., Puerini M. (2009) Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: an overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 160, 45–66, <https://doi.org/10.1007/s00410-009-0465-7>
- Sharpenok L.N., Kostin A.E., Kukharensko E.A. (2013) Alkali sum–silica TAS diagram for chemical classification and recognition of plutonic rocks. *Regionalnaya geologiya i metallogeniya (Regional Geology and Metallogeny)*, 56, 40–50 (in Russian).
- Sobolev N.V. (1964) Paragenetic types of garnets. Moscow, Nauka, 220 p. (in Russian).
- Strong D.F. (1981) Ore deposit models: 5. A model for granophile mineral deposits. *Geoscience Canada*, 8 (4), 155–161.
- Tuttle O.F., Bowen N.L. (1958) Origin of granite in the light of experimental studies in the system NaAlSi₃O₈–KAlSi₃O₈–SiO₂–H₂O. *Memoirs of the Geological Society of America*, 74, 153.
- Urvantsev N.N. (1931) Taimyr geological expedition of 1929. *Trudy glavnogo geologo-razvedyvatelnogo upravleniya (Proceedings of Main Geological Survey Directorate)*, 65, 40 p. (in Russian).
- Vernikovskiy V.A. (1996) Geodynamic evolution of the Taimyr folded area. Novosibirsk, SO RAN, 202 p. (in Russian)
- Vernikovskiy V.A., Vernikovskaya A.E., Proskurnin V.F., Matushkin N.Y., Proskurnina M.A., Kadilnikov P., Larionov A.N., Travin A.V. (2020) Late Paleozoic–Early Mesozoic granite magmatism on the Arctic margin of the Siberian Craton during the Kara–Siberia oblique collision and plume events. *Minerals*, 10, 571–611, <https://doi.org/10.3390/min10060571>
- Yardley B.W.D. (1989) An introduction to metamorphic petrology. Longman Group UK Ltd, 132 p.
- Zharikov V.A., Rusinov V.L. (1998) Metasomatism and metasomatic rocks. Moscow, Nauchny Mir, 492 p. (in Russian).

Информация об авторах

Юрий Вячеславович Кисельников – геолог, ФГБУ Всероссийский геологический научно-исследовательский институт им. А.П. Карпинского, г. Санкт-Петербург, Россия; yury.kiselnikoff@yandex.ru

Алексей Геннадьевич Шнейдер – ведущий геолог, ФГБУ Всероссийский геологический научно-исследовательский институт им. А.П. Карпинского, г. Санкт-Петербург, Россия

Василий Фёдорович Проскурнин – д.г.-м.н., заведующий отделом Севера Сибири, ФГБУ Всероссийский геологический научно-исследовательский институт им. А.П. Карпинского, г. Санкт-Петербург, Россия

Information about the authors

Yury V. Kiselnikov – Geologist, Karpinsky Geological Research Institute, St. Petersburg, Russia; yury.kiselnikoff@yandex.ru

Alexey G. Shneider – Leading Geologist, Karpinsky Geological Research Institute, St. Petersburg, Russia

Vasily F. Proskurnin – Doctor Geol.–Mineral. Sci., Head of the Department of North Siberia, Karpinsky Geological Research Institute, St. Petersburg, Russia

not corrected