



S-граниты Ижемской зоны фундамента Печорской синеклизы: особенности состава, результаты U-Pb SHRIMP-RG и ^{40}Ar - ^{39}Ar -датирования

В. Л. Андреичев¹, А. А. Соболева¹, Е. Г. Довжикова², М. А. Кобл³, Ю. Л. Ронкин⁴, А. В. Травин⁵

¹ Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия; izo@geo.komisc.ru

² Ухтинский государственный технический университет, Ухта, Россия

³ Стэнфордский университет, Стэнфорд, США

⁴ Институт геологии и геохимии им. А. Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия

⁵ Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

Граниты, вскрытые скважинами 1-Южная Болотная и 1-Сосьянская в Ижемской зоне Тиманского мегаблока фундамента Печорской синеклизы по особенностям минерального и химического состава наиболее близки к гранитам S-типа. U-Pb (SIMS SHRIMP-IIe и SHRIMP-RG)-исследование цирконов из этих гранитоидов не позволило корректно зафиксировать время образования пород, поскольку цирконы оказались либо унаследованными, либо высокоdiscordantными. ^{40}Ar - ^{39}Ar -датирование мусковитов из тех же образцов, в которых анализировались цирконы, дало возможность скорректировать возраст гранитов. ^{40}Ar - ^{39}Ar -возраст мусковита в гранитах скв. 1-Южная Болотная составил 548 ± 7 млн лет, а в скв. 1-Сосьянская – 565 ± 7 млн лет. Эти данные коррелируются с U-Pb (SIMS SHRIMP-IIe и SHRIMP-RG)-результатами по цирконам из гранитоидов других зон фундамента Печорской синеклизы и свидетельствуют о масштабном проявлении гранитоидного магматизма в позднем венде при коллизионных процессах на завершающей фазе тиманского тектогенеза.

Ключевые слова: Печорская синеклиза, Ижемская зона, фундамент, граниты, циркон, U-Pb SHRIMP-RG-возраст, мусковит, ^{40}Ar - ^{39}Ar -возраст мусковита

S-granites of the Izhma zone of the Pechora basin basement: features of composition, U-Pb and ^{40}Ar - ^{39}Ar dating results

V. L. Andreichev¹, A. A. Soboleva¹, E. G. Dovzhikova², M. A. Coble³, Yu. L. Ronkin⁴, A. V. Travin⁵

¹ Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar, Russia

² Ukhta State Technical University, Ukhta, Russia

³ Stanford University, Stanford, USA

⁴ A. N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS, Yekaterinburg, Russia

⁵ V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia

Granites recovered by boreholes 1-Yuzhnaya Bolotnaya and 1-Sosyanskaya in the Izhma zone of the Timan megablock of the Pechora basin basement are most similar in their mineral and chemical composition to S-type granites. U-Pb (SIMS SHRIMP-IIe and SHRIMP-RG) zircon studies of these granitoids have not allowed for a correct determination of the rock formation time, as the zircons are either inherited or highly discordant. The granite age has been revised by the ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of muscovite from the same samples. The ^{40}Ar - ^{39}Ar age of muscovite in granites of the 1-Yuzhnaya Bolotnaya borehole is 548 ± 7 Ma and in the 1-Sosyanskaya borehole is 565 ± 7 Ma. These data correlate with U-Pb (SIMS SHRIMP-IIe and SHRIMP-RG) ages on zircons from granites of other zones of Pechora basin basement and confirms the large-scale intrusion of granitoids in the Late Vendian during collision processes at the final stage of Timanian tectogenesis.

Keywords: Pechora basin, Izhma zone, basement, granite, zircon, U-Pb SHRIMP-RG age, muscovite, ^{40}Ar - ^{39}Ar age of muscovite

Введение

Геохронологические исследования структурно-вещественных комплексов верхнедокембрийского фундамента Печорской синеклизы были начаты в 70-е годы прошлого столетия, основывались преимущественно на K-Ar-методе, а их результаты публиковались по мере накопления возрастных данных (Акимова, 1980;

Фишман и др., 1981; Gee et al., 2000; Андреичев, Литвиненко, 2007). Преобладающая часть изотопных датировок по магматическим породам, преимущественно гранитоидам, приходилась на интервал 600–500 млн лет, что и давало основание считать их возраст венд-кембрийским. Дальнейшие работы были связаны с $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ -датированием единичных зерен

Для цитирования: Андреичев В. Л., Соболева А. А., Довжикова Е. Г., Кобл М. А., Ронкин Ю. Л., Травин А. В. S-граниты Ижемской зоны фундамента Печорской синеклизы: особенности состава, результаты U-Pb SHRIMP-RG и ^{40}Ar - ^{39}Ar -датирования // Вестник геонаук. 2025. 11(371). С. 3–19. DOI: 10.19110/geov.2025.11.1

For citation: Andreichev V. L., Soboleva A. A., Dovzhikova E. G., Coble M. A., Ronkin Yu. L., Travin A. V. S-granites of the Izhma zone of the Pechora basin basement: features of composition, U-Pb and ^{40}Ar - ^{39}Ar dating results. Vestnik of Geosciences, 2025, 11(371), pp. 3–19, doi: 10.19110/geov.2025.11.1

циркона из гранитов и диоритов методом ступенчатого испарения свинца (Gee et al., 2000). Полученные возрастные значения образуют узкий диапазон 567–551 млн лет, отвечающий границе раннего–позднего венда, которой в шкале геологического времени отводится интервал 570–555 млн лет (Стратиграфический кодекс..., 2019). Полученные в это же время Rb-Sr изохронным методом оценки возраста (Андреичев, Литвиненко, 2000) не всегда коррелировались с цирконовыми датировками, поэтому корректировка возраста гранитоидного магматизма возможна при получении дополнительных аргументов. Для этого необходим U-Pb-анализ цирконов, поскольку при их датировании только по отношению радиогенных изотопов свинца отсутствует контроль конкордантности. Кроме того, из-за низких содержаний радиогенного ^{207}Pb в относительно молодых (< 1 млрд лет) цирконах потенциально более надежны $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ -возрасты (Борисова и др., 1995). На основании этих предположений в последнее десятилетие были предприняты локальные U-Pb-исследования цирконов из имеющегося в нашем распоряжении кернового материала.

Краткие сведения по геологии Печорской синеклизы и постановка проблемы

Печорская синеклиза (термин впервые введен академиком А. П. Павловым в 1903 г. применительно к Печорской низменности) располагается между Тиманом и Предуральским краевым прогибом (рис. 1). В ее геологическом строении участвуют осадочно-метаморфические и магматические породы верхнедокембрийского фундамента, повсеместно перекрытые неморфизованными осадочными и вулканогенными образованиями фанерозойского платформенного чехла мощностью 1–7 км, поэтому все сведения о породах фундамента основаны на геофизических данных и результатах бурения скважин разных категорий глубиной до 5 км (Белякова и др., 2008). В строении фундамента по вещественному составу и характеру магматизма выделяются с юго-запада на северо-восток Ижемская, Печорская и Большеземельская зоны. Две последние объединяются в Большеземельский мегаблок, а Ижемская зона с примыкающим с юго-запада Тиманом — в Тиманский мегаблок (Дедеев и др., 1974; Белякова, 1983; Дедеев, Запорожцева, 1985; Белякова и др., 2008). Вместе они образуют Печорскую (Тимано-Печорскую) плиту. Границей между мегаблоками служит Припечорская разломная зона, состоящая из Чаркаю-Пылемецкого и Илыч-Чикшинского глубоких разломов, простирающихся в северо-западном направлении от Урала до Печороморской впадины (Костюченко, 1994; Оловянишников и др., 1996). Разломы, не выраженные на поверхности, зафиксированы по положительной магнитной аномалии, именуемой Припечорской (Гафаров, 1970).

Общее строение верхнедокембрийского фундамента Печорской синеклизы, характер магматизма позволяют интерпретировать Тиманский мегаблок как область отложений пассивной окраины Восточно-Европейского континента на погружающемся карельском кристаллическом фундаменте (Пучков, 1975; Гецен, 1991). Увеличение глубокководности осадков наблюдается в северо-восточном направлении от Тимана

к Припечорской зоне разломов (Пучков, 1975), вдоль которой функционировали зона субдукции и связанная с ней островодужная система, занимавшая территорию Печорской зоны (Белякова, Степаненко, 1991; Белякова, Довжикова, 2006; Белякова и др., 2008). Предполагается, что в пределах Большеземельского мегаблока существовал позднерифейско-вендский океанический бассейн, называемый Печорским (Пучков, 2005).

Среди магматических пород фундамента Печорской синеклизы существенное место отводится гранитоидам. Они вскрыты в 26 скважинах во всех зонах (Белякова и др., 2008), но U-Pb-датирование цирконов в режиме вторично-ионной масс-спектрометрии (SIMS) на ионных микрозондах SHRIMP проводилось по тем скважинам, для которых имелся в наличии керн. Установленные конкордантные возрасты цирконов показаны на рис. 1, а сведения о результатах датирования приведены в ряде статей: скв. 1-Южная Болотная и 54-Седуха (Андреичев и др., 2014б); скв. 1-Чаркаю, 1-Южная Чаркаю, 1-Восточная Чаркаю (Андреичев и др., 2017а); скв. 1-Малая Пера, 1-Южный Джьер, 1-Нижняя Омра, 1-Прилукская (Андреичев и др., 2024); скв. 1-Изкось-гора (Соболева, Андреичев, 2025); скв. 1-Новая (Андреичев и др., 2023а); скв. 26-Восточная Харьяга, 2-Веяк (Андреичев и др., 2023б). Полученные результаты свидетельствуют о двух эпизодах гранитоидного магматизма, связанных с субдукционными и коллизионными процессами, которые привели в конце венда к образованию орогена Тиманид. Основная масса возрастов приходится на интервал 564–536 млн лет, который, по всей видимости, соответствует финальной стадии закрытия океана, которой предшествовал субдукционный(?) этап 607–602 млн лет.

Самый древний возраст, равный 1056 ± 18 млн лет, зафиксирован в скв. 1-Южная Болотная, с которой и начались локальные U-Pb-исследования цирконов из гранитоидов фундамента Печорской синеклизы (Андреичев и др., 2014б). Результаты датирования ядер в 12 зернах охватывают интервал 2776–1008 млн лет, минимальный возраст по трем зернам составил 1056 ± 18 млн лет. В данной ситуации было логично предположить, что этот возраст соответствует времени формирования гранитов, а цирконы с более древними возрастными унаследованы из осадочного протолита. Это предположение имело принципиальное значение, поскольку в геологии Тимано-Печорской плиты до сих пор остается неизвестным время заложения Тиманской пассивной континентальной окраины, которое в разных интерпретациях изменяется от раннего рифея до венда. Равным образом эта неопределенность относится и к возрасту прорываемых гранитами метаосадочных пород фундамента. Возраст цирконов из гранитов скв. 1-Южная Болотная давал основание считать временем заложения по крайней мере средний рифей. Однако это предположение не нашло подтверждения при датировании цирконов из гранитоидов других скважин, а при определении возраста детритовых цирконов из метаосадочных пород Северного Тимана (Андреичев и др., 2014а; 2017б; 2018) и Среднего Тимана (Удуратина и др., 2017; Соболева и др., 2019; Брусницына и др., 2021) были получены миллиардные датировки. То есть обломочные породы, отлагавшиеся на Тиманской пассивной окраине, не могли быть сформированы рань-

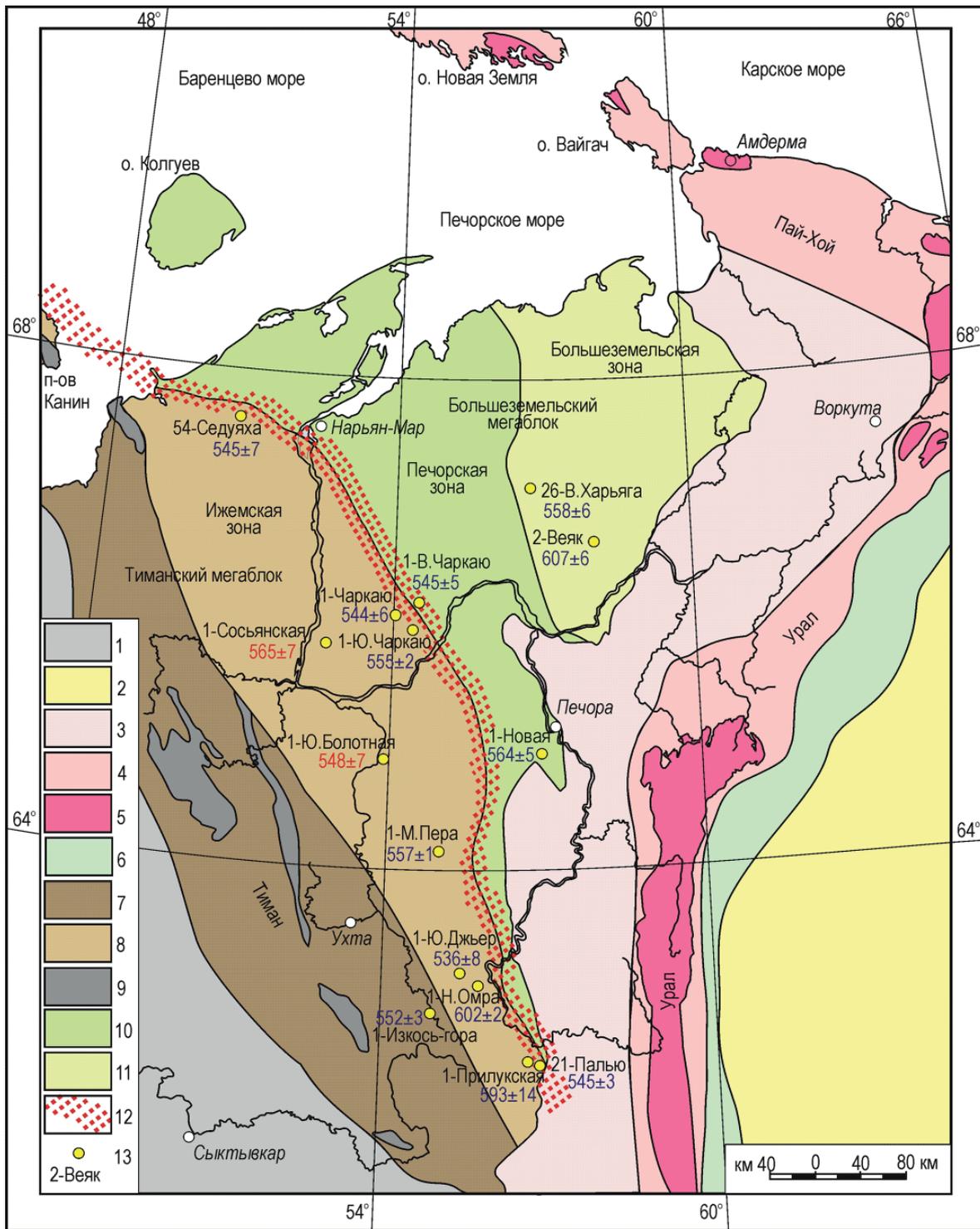


Рис. 1. Тектоническое строение фундамента Печорской синеклизы и ее обрамления (по: Тимано-Печорский..., 2000; Белякова и др., 2008): 1 — Восточно-Европейский кратон; 2 — Западно-Сибирская плита; 3–6 — Урал: 3 — Предуральский краевой прогиб, 4 — Западно-Уральская мегазона, палеозойские комплексы Пай-Хоя, о-ва Вайгач и архипелага Новая Земля, 5 — Центрально-Уральская мегазона, верхнедокембрийские комплексы Пай-Хоя, о-ва Вайгач и архипелага Новая Земля, 6 — Восточно-Уральская мегазона; 7–11 — фундамент Тимано-Печорской плиты: 7 — Тиман, 8 — Ижемская зона, 9 — выходы на поверхность комплексов фундамента, 10 — Печорская зона, 11 — Большеземельская зона; 12 — Припечорская зона разломов (северо-западная часть — Чаркаю-Пылеметский разлом, юго-восточная часть — Ильич-Чикшинский разлом), 13 — скважины. Цветом выделен возраст гранитоидов: синим — определенный по циркону (U-Pb, SIMS), красным — по мусковиту ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$)

Fig. 1. Tectonic structure of the basement of the Pechora basin and its frame (according to Timan-Pechora..., 2000; Belyakova et al., 2008): 1 — East European Craton; 2 — West Siberian Plate; 3–6 — the Urals: 3 — Cis-Ural Foredeep, 4 — West Ural megazone, Paleozoic complexes of Pai-Khoi, Vaigach Island, and Novaya Zemlya Archipelago, 5 — Central Ural megazone, Upper Precambrian complexes of Pai-Khoi, Vaigach Island, and Novaya Zemlya Archipelago, 6 — East Ural megazone; 7–11 — basement of the Pechora plate: 7 — Timan; 8 — Izhma zone; 9 — exposures of the basement; 10 — Pechora zone; 11 — Bolshezemel'skaya zone; 12 — Pripechorsky fault zone (northwestern part — Charkayu-Pylemets fault, southeastern part — Ilych-Chikshino fault); 13 — boreholes. The ages of granitoids is highlighted in color: blue — zircon ages (U-Pb, SIMS), red — muscovite ages ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$)

ше позднего рифея, а возраст гранитов не должен превышать 1 млрд лет. Следовательно, все цирконы в скв. 1-Южная Болотная являются унаследованными, а для оценки возраста гранитов следует искать дополнительные аналитические методы. По нашему мнению, для этой цели может быть полезным ^{40}Ar - ^{39}Ar -датирование мусковита, поскольку граниты не испытали значительных метаморфических преобразований и минеральный состав породы должен соответствовать первично-магматическому парагенезису. Этим же методом протартирован мусковит из гранитов скв. 1-Сосьянская, которые оказались во многом похожи на гранитоиды 1-Южной Болотной.

Методы исследования

Содержания петрогенных оксидов в породах определены методом классического химического анализа в лаборатории химии минерального сырья Института геологии Коми научного центра УрО РАН (Сыктывкар, аналитик О. В. Кокшарова). Определения содержаний элементов-примесей выполнены методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) в ЦКП «Геоналитик» Института геологии и геохимии УрО РАН (Екатеринбург), аналитические процедуры опубликованы (Ронкин и др., 2005).

Определение состава минералов произведено на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA 3 LMN с энергодисперсионной приставкой Instruments X-Max в ЦКП «Геонаука» Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (Сыктывкар).

U-Pb-датирование индивидуальных зерен циркона из гранитов скв. 1-Сосьянская, а также определение содержаний в цирконе элементов-примесей выполнено на вторично-ионном микронзонде обратной геометрии SHRIMP-RG, принадлежащем Стэнфордскому университету и Геологической службе США. Изображения цирконов получены на сканирующем электронном микроскопе JEOL LV 5600, оснащенный катодолуминесцентным детектором. Изотопные измерения выполнялись согласно стандартным процедурам (Ireland, Gibson, 1998; Coble et al., 2018). Обработка полученных аналитических данных проведена с использованием программы SQUID-2 (Ludwig, 2009). Отношения Pb/U нормированы на значение $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} = 0.0668$ в стандартном цирконе TEMORA (Black et al., 2003).

^{40}Ar - ^{39}Ar -датирование мусковитов из гранитов в скважинах 1-Сосьянская и 1-Южная Болотная проведено в лаборатории изотопно-аналитической геохимии Института геологии и минералогии СО РАН (Новосибирск), аналитические процедуры опубликованы (Травин и др., 2009).

Особенности минерального и химического состава пород

Скважины 1-Южная Болотная и 1-Сосьянская (рис. 1) находятся в центральной части Ижемской зоны. В скв. 1-Южная Болотная граниты вскрыты в интервале 2456–2624 м (забой). Отбор цирконов производили из гранита с глубины 2515.7 м. Скв. 1-Сосьянская, пробуренная примерно в 80 км к северо-западу от скв. 1-Южная Болотная, вскрыла граниты в интервале 2972–3300 м (забой). Проба на циркон отобрана из интерва-

ла 3292.2–3296.0 м. Скважины вскрывают небольшие гранитные массивы. Судя по размерам отрицательных магнитных аномалий (Белякова и др., 2008), гранитное тело, вскрытое скв. 1-Южная Болотная, не превышает в длину 13 км и в ширину — 7 км. Размер интрузива, вскрытого скв. 1-Сосьянская, составляет 17×7 км. Выше гранитов в обеих скважинах с резким угловым несогласием залегают кварцевые песчаники седельской свиты среднего кембрия — нижнего ордовика (Белякова, 1988; Решения..., 1987).

Биотит-мусковитовые граниты из скв. 1-Южная Болотная розовато-серые, массивной текстуры и средне- и крупнозернистой гранитовой структуры (рис. 2, а, б). Они состоят из кварца, калиевого полевого шпата (микроклина) и плагиоклаза примерно в равных соотношениях и содержат около 5 об. % слюд — хлоритизированного красно-коричневого высокожелезистого ($x(\text{Mg}) 0.31$ – 0.32) и высокоглиноземистого биотита (табл. 1) и мусковита. Более крупные зерна плагиоклаза в центральных частях сосюритизированы, а по краям — чистые, альбит-олигоклазового состава (An_{9-15}). Они содержат включения листочков биотита и мусковита. Выделения калиевого полевого шпата заключают в себе мелкие зерна плагиоклаза и кварца, а также чешуйки мусковита и биотита. На границе калиевого полевого шпата и плагиоклаза участками развит мirmekитовый агрегат. Акцессорные минералы представлены цирконом, апатитом, монацитом и торитом. Рутил, флюорит и пирит, встречающиеся в виде включений в хлоритизированном биотите, вероятно, являются вторичными.

Граниты из скв. 1-Сосьянская имеют похожий минеральный состав и структуру (рис. 2, с, д), отличаясь более кислым составом плагиоклаза (Ab_{0-9}), еще более низкой магнезиальностью биотита ($x(\text{Mg}) 0.24$ – 0.27), заметным содержанием фтора в апатите и отсутствием флюорита и пирита. Акцессорные минералы те же, за исключением торита, и дополнительно присутствуют уранинит и коффиинит.

Граниты из скважин 1-Сосьянская и 1-Южная Болотная характеризуются преимущественно повышенной щелочностью: ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) составляет в них 8.70 и 7.94–8.77 мас. % при концентрациях SiO_2 71.68 и 70.60–74.46 мас. % соответственно (табл. 2., рис. 3, а). По содержанию K_2O (4.45 и 3.47–5.30 мас. %) породы относятся к высококалиевым (рис. 3, б) и для них характерен калиево-натриевый тип щелочности: $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 0.96$ в гранитах скв. 1-Сосьянская и 0.55–0.78 в скв. 1-Южная Болотная, за исключением одного образца, в котором это отношение равно 1.3.

По петрохимической классификации породы относятся к семействам гранитов и умеренно-щелочных гранитов, на диаграмме Ab–An–Or точки их составов располагаются в поле гранитов (рис. 3, с).

Граниты из обеих скважин относятся к перглиноземистым, индекс Шенда составляет в них 1.14–1.31 (рис. 3, д).

Рассматриваемые породы характеризуются низкими для гранитоидов концентрациями TiO_2 (0.04–0.20 мас. %), MgO (0.20–0.68 мас. %), CaO (0.50–0.95 мас. %) и повышенными содержаниями P_2O_5 (0.17–0.23 мас. %).

Концентрации литофильных элементов-примесей в исследуемых гранитах (проанализировано по од-

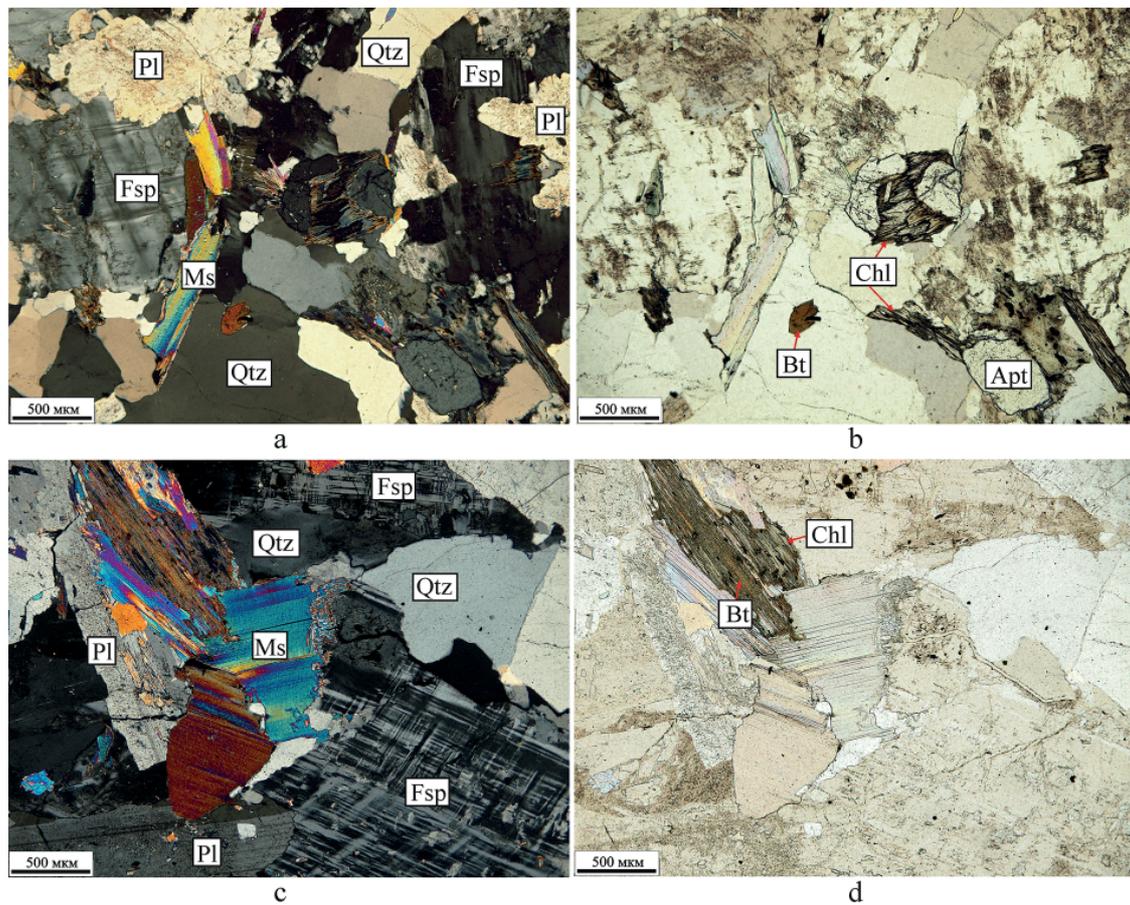


Рис. 2. Микрофотографии шлифов из гранитов скважин 1-Южная Болотная (а, b) и 1-Сосьянская (с, d) с анализатором (а, с) и без анализатора (b, d). Qtz – кварц, Pl – плагиоклаз, Fsp – калиевый полевой шпат, Bt – биотит, Ms – мусковит, Apt – апатит, Chl – хлорит

Fig. 2. Thin-section photomicrographs of granites from 1-Yuzhnaya Bolotnaya borehole (a, b) and 1-Sosyanskaya borehole (c, d), under cross polarized (a, c) and plane polarized light (b, d). Qz – quartz, Pl – plagioclase, Fsp – alkali feldspar, Bt – biotite, Ms – muscovite, Apt – apatite, Chl – chlorite

Таблица 1. Химический состав биотита из гранитов, мас. %

Table 1. Chemical composition of biotite from granites, wt. %

Компонент Component	1-Южная Болотная / 1-Yuzhnaya Bolotnaya				1-Сосьянская / 1-Sosyanskaya				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO ₂	34.51	32.25	33.74	32.75	36.36	35.81	34.44	34.49	36.28
TiO ₂	2.37	2.84	2.87	2.49	2.75	2.23	2.14	2.84	2.35
Al ₂ O ₃	19.4	18.91	19.46	19.03	19.74	19.82	19.28	19.59	20.31
FeO	23.59	23.47	22.94	24	20.48	22.26	21.77	22.28	22.66
MnO	0.43	0.47	0.44	0.5	0.71	0.73	0.77	0.63	0.61
MgO	6.23	5.95	6	6.14	4.4	4.35	4.41	4.28	4.22
K ₂ O	8.1	8.09	8.4	7.28	9.46	9.47	9.35	9.63	9.44
Сумма / Sum	94.63	91.98	93.85	92.19	93.9	94.67	92.16	93.74	95.87
Si, ф.ед.	2.79	2.69	2.75	2.73	2.97	2.91	2.87	2.83	2.91
Ti	0.14	0.18	0.18	0.16	0.17	0.14	0.13	0.18	0.14
Al	1.85	1.86	1.87	1.87	1.9	1.89	1.89	1.89	1.92
Al _{IV}	1.21	1.31	1.25	1.27	1.03	1.09	1.13	1.17	1.09
Al _{VI}	0.64	0.55	0.63	0.6	0.87	0.8	0.76	0.72	0.83
Fe ^{IV}	1.59	1.64	1.56	1.67	1.4	1.51	1.51	1.53	1.52
Mn	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04
Mg	0.75	0.74	0.73	0.76	0.54	0.53	0.55	0.52	0.5
K	0.84	0.86	0.87	0.77	0.98	0.98	0.99	1.01	0.97
X(Mg)	0.32	0.31	0.31	0.31	0.27	0.25	0.26	0.25	0.24

Примечание. Анализы 1–4 и 6–9 выполнены в частично хлоритизированных листочках биотита.

Note. Analyses 1–4 and 6–9 were made on partially chloritized biotite leaflets.

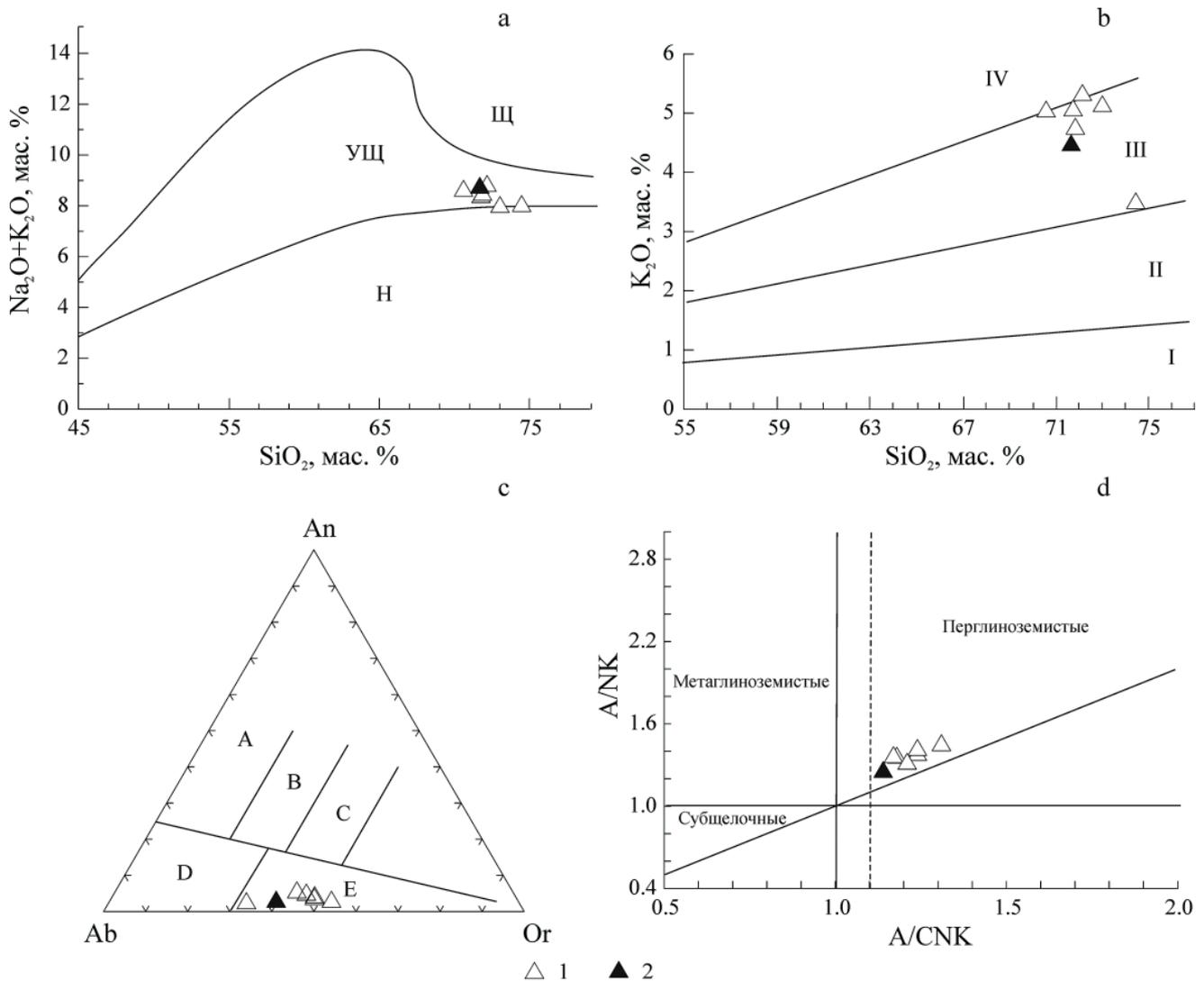


Рис. 3. Дискриминационные диаграммы для изученных гранитов: а – SiO_2 – $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ (по: Le Maitre, 1989); б – SiO_2 – K_2O , (по: Rickwood, 1989); в – Ab-An-Or , (по: O'Connor, 1965); д – A/CNK-A/NK , (по: Maniar, Piccoli, 1989). На рисунке (а) буквами обозначены поля состава пород нормальной (Н) и умеренной (УЩ) щелочности, а также щелочных пород (Щ). Поля гранитоидов на рисунке (с): А – тоналиты, В – гранодиориты, С – адамеллиты, D – тронджемиты, E – граниты. 1 – скв. 1-Южная Болотная, 2 – скв. 1-Сосьянская

Fig. 3. Discrimination diagrams for the studied granites. а – SiO_2 – $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ (Le Maitre, 1989), б – SiO_2 – K_2O (Rickwood, 1989), в – Ab-An-Or (O'Connor, 1965), д – A/CNK-A/NK (Maniar, Piccoli, 1989). The letters on (а) indicate fields of rocks of low (Н), moderate (УЩ) and high (Щ) alkalinity. The letters refer to fields on (с): А – tonalites, В – granodiorites, С – adamellites, D – trondhjemites, E – granites. 1 – 1-Yuzhnaya Bolotnaya borehole, 2 – 1-Sosyanskaya borehole

ному образцу из каждой скважины) заметно варьируют (табл. 3). Так, например, содержание Rb в гранитах из скв. 1-Южная Болотная составляет 208 г/т, а в скв. 1-Сосьянская – 51 г/т, Sr – 42 г/т и 120 г/т, Y – 5 г/т и 12 г/т, Ba – 207 г/т и 1261 г/т, Zr – 28 г/т и 167 г/т соответственно. Несмотря на такие различия, для рассматриваемых гранитов прослеживается похожая тенденция обогащенности крупноионными элементами (K, Rb, Ba), а также Th и Ta и обеднения высокозарядными (Zr, Y и HREE) по сравнению с рассчитанным (Pearce et al., 1984) модельным составом гранитов срединно-океанических хребтов (рис. 4, а).

Концентрации редкоземельных элементов (REE) в породах из скв. 1-Сосьянская примерно в 5 раз выше, чем в гранитах из скв. 1-Южная Болотная, но характер их распределения в этих двух образцах очень похож (рис. 4, б): характерно обогащение легкими REE относительно тяжелых (La_N/Yb_N – 36 и 25) и проявлен-

ный дефицит европия ($\text{Eu}_N/\text{Eu}_N^*$ – 0.53 и 0.58 соответственно).

Результаты U-Pb SHRIMP-RG-датирования циркона и особенности их состава

В скв. 1-Сосьянская зерна циркона (60–150 мкм) отобраны из гранита (обр. 28) в интервале глубин 3292.2–3296.0 м. Многие зерна окатанные, со сглаженными вершинами и ребрами, в некоторых сохранились блестящие грани. Полностью окатанные зерна имеют матовую поверхность. Большинство зерен непрозрачные или полупрозрачные, лишь отдельные прозрачные, достаточно чистые, без включений. В породе преобладают светло-розовые и розовые удлиненно-призматические, с частично сохранившимися гранями призмы до эллипсовидных цирконовые зерна с коэффициентом удлинения (K_y) 1.5–3, реже встреча-



Таблица 2. Содержание петрогенных оксидов в гранитах, мас. %

Table 2. Main oxide contents in granites, wt. %

Скважина Borehole	1-Южная Болотная 1-Yuzhnaya Bolotnaya						1-Сосьянская 1-Sosyanskaya
	№ обр. / Sample No.	21/1	21/6	22/3	23/3	24/1	24/2
Глубина, м / Depth, m	2500.5	2505.5	2509.7	2513.2–2518.2	2518.6	2519.6	3292.2–3296
SiO ₂	72.16	70.60	71.76	71.86	74.46	73.02	71.68
TiO ₂	0.17	0.12	0.18	0.04	0.04	0.17	0.20
Al ₂ O ₃	15.69	15.24	15.29	15.16	14.60	14.68	14.72
Fe ₂ O ₃	0.25	0.79	0.48	0.33	0.16	0.22	0.33
FeO	0.94	1.28	1.07	1.01	0.38	0.75	1.34
MnO	0.02	н/о	0.03	0.03	0.05	0.02	0.03
MgO	0.40	0.68	0.50	0.54	0.20	0.40	0.38
CaO	0.67	0.87	0.78	0.95	0.50	0.56	0.64
Na ₂ O	3.47	3.56	3.29	3.69	4.51	2.83	4.25
K ₂ O	5.30	5.02	5.04	4.73	3.47	5.11	4.45
P ₂ O ₅	0.18	0.21	0.23	0.21	0.17	0.20	0.22
П.п.п. / LOI	1.33	1.61	1.27	1.44	0.87	1.56	1.10
Сумма / Sum	100.57	99.98	99.92	99.99	99.41	99.51	99.33
H ₂ O ⁻	0.27	0.20	0.18	0.23	0.27	0.30	0.15
CO ₂	<0.1	0.28	<0.1	0.16	<0.1	<0.1	<0.1

Таблица 3. Содержание элементов-примесей в гранитах Ижемской зоны, г/т

Table 3. Trace element contents in granites of Izhma zone, ppm

Компонент Component	1-Южная Болотная 1-Yuzhnaya Bolotnaya	1-Сосьянская 1-Sosyanskaya	Компонент Component	1-Южная Болотная 1-Yuzhnaya Bolotnaya	1-Сосьянская 1-Sosyanskaya
	23/3	28		23/3	28
Li	113	56.1	Ba	207	1261
Be	12.4	3.98	La	22.3	102
Sc	1.94	5.92	Ce	48.0	201
V	6.04	35.3	Pr	5.54	24.9
Cr	77.5	51.3	Nd	21.2	93.0
Co	1.67	7.02	Sm	4.22	15.1
Ni	41.5	13.6	Eu	0.64	2.60
Cu	16.5	6.97	Gd	2.97	11.2
Zn	30.3	28.7	Tb	0.41	1.15
Ga	20.4	8.21	Dy	1.88	6.76
Ge	1.16	0.64	Ho	0.27	1.23
Rb	208	70.7	Er	0.61	3.37
Sr	42.4	120	Tm	0.08	0.47
Y	5.23	12.2	Yb	0.45	2.90
Zr	28.3	167	Lu	0.06	0.42
Nb	6.66	13.5	Hf	1.36	10.3
Mo	0.60	0.17	Ta	2.43	2.04
Ag	0.72	0.58	W	1.95	15.3
Cd	0.01	0.21	Tl	1.68	0.57
Sn	17.7	1.92	Pb	29.8	8.60
Sb	0.05	0.47	Bi	0.88	0.04
Te	0.005	н/о	Th	11.3	20.7
Cs	36.1	5.53	U	3.56	4.94

ются светло-розовые, почти бесцветные, близкие к шаровидным, окатанные, непрозрачные, с матовой поверхностью. В небольшом количестве присутствуют темно-желтые идиоморфные бипирамидально-призматические (цирконового габитуса), с шероховатыми поверхностями кристаллы с K_y 4–5. Катодолюминесцентные изображения (рис. 5) демонстрируют на-

личие в зернах циркона тонкой или более грубой осцилляционной зональности и присутствие в некоторых зернах предположительно детритовых ядер (например, в зернах 3 и 9).

Результаты аналитических измерений 12 зерен приведены в табл. 4. Диапазон $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ -возрастов составляет 1844–252 млн лет. В трех аналитических кра-

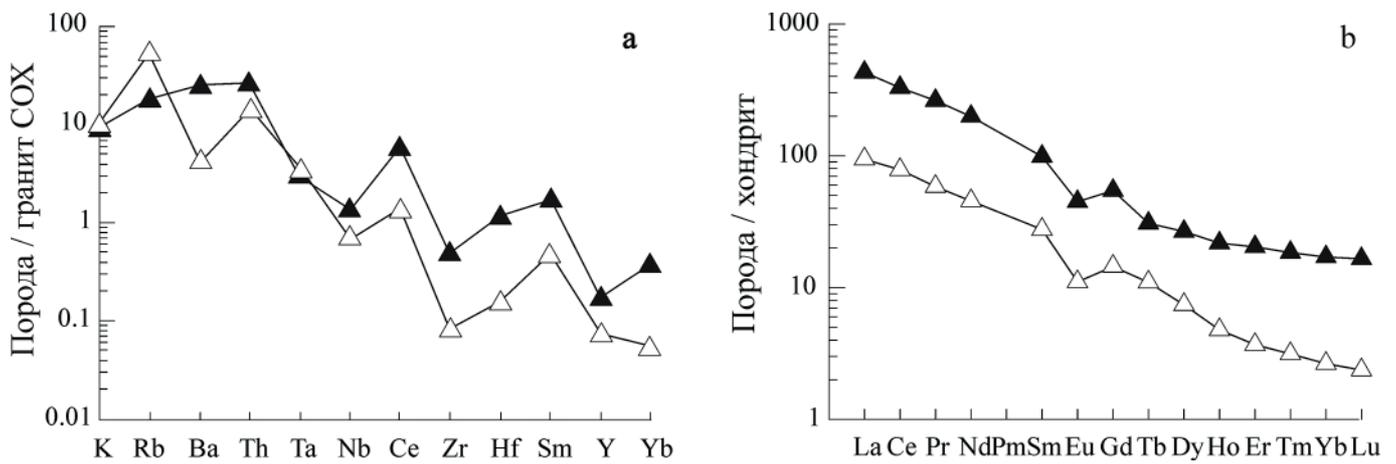


Рис. 4. Графики, иллюстрирующие геохимические особенности гранитов: а — содержания элементов-примесей, б — распределения REE. Концентрации элементов нормированы к составу: а — модельного гранита СОХ (Pearce et al., 1984), б — хондрита CI (Sun, McDonough, 1989). Усл. обозн. — см. рис. 3

Fig. 4. Diagrams illustrating the geochemical features of granites: а — trace element contents, б — REE pattern. Element concentration is normalized to: а — ORG granite (Pearce et al. 1984), б — CI chondrite (Sun, McDonough, 1989). Legend — see Fig. 3

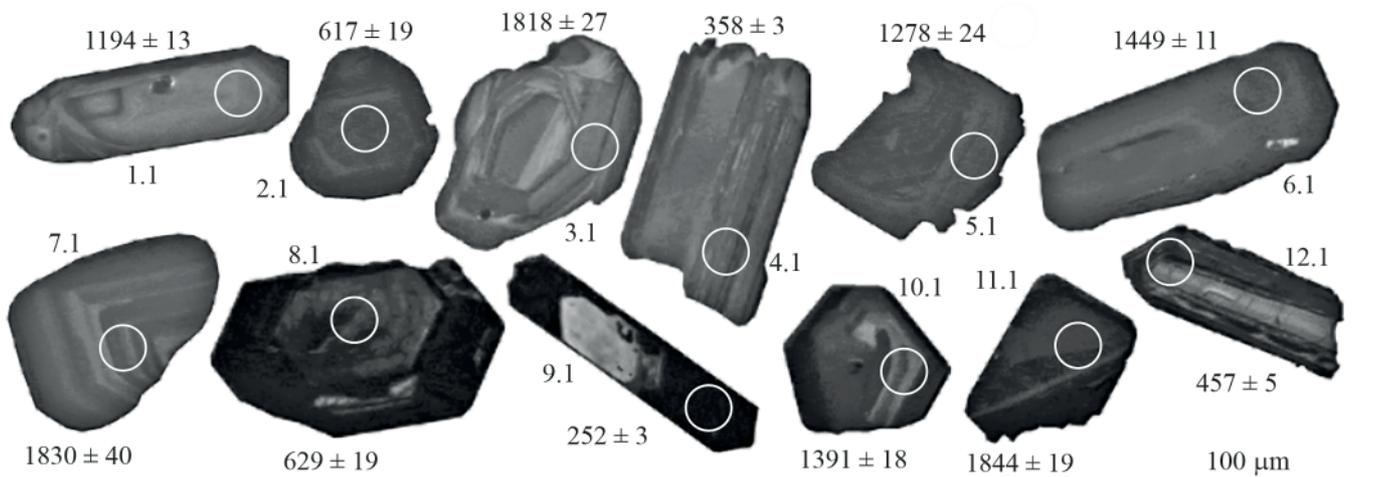


Рис. 5. Катодолуминесцентные изображения зерен циркона из гранитов скв. 1-Сосьянская. Номера аналитических кратеров соответствуют номерам в табл. 4

Fig. 5. Cathodoluminescent images of zircon grains from granites of the 1-Sosyanskaya borehole. Numbers of analytical craters as in the Table 4

терах (3.1, 7.1 и 11.1) в зонах роста с осцилляционной зональностью получены позднекарельские датировки (1844 ± 19 , 1830 ± 40 и 1818 ± 27 млн лет). Две точки (6.1 и 10.1) показали возрасты, соответствующие раннему рифею (1449 ± 11 и 1391 ± 18 млн лет). Два анализа (5.1 и 1.1) дали среднерифейские датировки (1278 ± 24 и 1194 ± 13 млн лет). В точках 8.1. и 2.1 в центральных частях зерен циркона определен позднерифейский возраст (629 ± 19 и 617 ± 19 млн лет). Три датировки (457 ± 5 , 358 ± 3 и 252 ± 3 млн лет), соответствующие позднему ордовику, началу раннего карбона и окончанию поздней перми, получены в аналитических кратерах 12.1, 4.1 и 9.1. Наиболее молодая из них относится к идиоморфному удлинённо-призматическому зерну, выделяющемуся на фоне других зерен высокими содержаниями U и Th ($20\ 538$ и 1115 мкг/т соответственно).

Анализ химического состава зерен циркона из гранитов скв. 1-Сосьянская показал их большое разнообразие (табл. 5, рис. 6). Результаты, полученные по

трем кратерам (2.1 — 617 ± 19 млн лет, 5.1 — 1278 ± 24 млн лет, 9.1 — 252 ± 3 млн лет), расположенным во внешних зонах роста кристаллов, показывают, что исследованные части зерен заметно обогащены легкими REE (рис. 6, а) и по составу приближаются к гидротермальным цирконам (рис. 6, б). Графики распределения REE, построенные для остальных зерен, имеют более-менее схожий облик при заметных вариациях содержания элементов, и можно предположить, что они соответствуют магматическим цирконам из пород различного состава. В частности, по содержанию Y и U (рис. 6, с) проанализированные зерна отвечают циркону из основных пород, сиенитовых пегматитов и гранитоидов (преимущественно гранодиоритов и тоналитов). Этому разнообразию соответствует достаточно большой разброс величин Th/U ($0.01-0.99$) и рассчитанных по содержанию Ti в цирконе (Watson et al., 2006) минимально возможных температур магматических расплавов, из которых кристаллизовались цирконы (табл. 5). За исключением предположительно гидротермальных

Таблица 4. Результаты U-Pb-изотопных исследований циркона из гранитов скв. 1-Сосьянская (обр. 28, инт. 3292.2–3296 м)

Table 4. Results of U-Pb-dating of zircon grains from granites of 1-Sosyanskaya borehole (sample 28, depth 3292.2–3296 m)

Зерно, кратер Grain, spot	$^{206}\text{Pb}_c$ %	Содержания, мкг/г Content, ppm			$\frac{^{232}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$	Изотопные отношения $\pm\%$ (1σ) Isotope ratios $\pm\%$ (1σ)			Rho	Возраст, млн лет $\pm 1\sigma$ Age, Ma $\pm 1\sigma$		D, %
		$^{206}\text{Pb}^*$	U	Th		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	
9.1	2.50	702.5	20538	1115	0.06	0.0398 ± 1.3	0.289 ± 2.0	0.0527 ± 1.6	0.65	252 ± 3	316 ± 36	25
4.1	9.37	79.6	1622	240	0.15	0.0571 ± 0.9	0.406 ± 5.9	0.0516 ± 5.9	0.15	358 ± 3	265 ± 135	-26
12.1	4.22	62.5	991	457	0.48	0.0734 ± 1.2	0.568 ± 3.2	0.0562 ± 3.0	0.38	457 ± 5	459 ± 66	+0
2.1	63.05	67.2	803	285	0.37	0.1004 ± 3.3	0.748 ± 65.6	0.0541 ± 65.6	0.05	617 ± 19	373 ± 1476	-40
8.1	0.93	190.1	2160	31	0.01	0.1025 ± 3.2	0.829 ± 7.8	0.0587 ± 7.1	0.41	629 ± 19	554 ± 155	-12
1.1	0.24	12.4	71	20	0.29	0.2035 ± 1.2	2.195 ± 2.2	0.0782 ± 1.9	0.55	1194 ± 13	1151 ± 38	-4
5.1	38.33	89.6	500	320	0.66	0.2192 ± 2.1	2.943 ± 17.7	0.0974 ± 17.6	0.12	1278 ± 24	1574 ± 329	23
10.1	17.58	31.4	155	52	0.34	0.2408 ± 1.4	2.928 ± 13.9	0.0882 ± 13.9	0.10	1391 ± 18	1385 ± 266	-0
6.1	7.92	82.1	382	185	0.50	0.2521 ± 0.9	3.374 ± 6.8	0.0971 ± 6.8	0.13	1449 ± 11	1568 ± 127	8
3.1	0.50	22.1	79	57	0.74	0.3258 ± 1.7	4.992 ± 2.1	0.1111 ± 1.2	0.81	1818 ± 27	1817 ± 23	-0
7.1	0.66	35.3	125	120	0.99	0.3282 ± 2.5	4.960 ± 2.7	0.1096 ± 1.2	0.93	1830 ± 40	1792 ± 21	-2
11.1	-	44.9	158	71	0.46	0.3312 ± 1.2	5.124 ± 1.3	0.1122 ± 0.6	0.92	1844 ± 19	1836 ± 11	-0

Примечание. Ошибка в калибровке стандарта составляет 0.15%. $^{206}\text{Pb}_c$ и $^{206}\text{Pb}^*$ — обыкновенный и радиогенный свинец. Изотопные отношения и содержания ^{206}Pb скорректированы по измеренному ^{204}Pb . D — дискордантность: $D = 100 \times [\text{возраст} (^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}) / \text{возраст} (^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}) - 1]$. Rho — коэффициент корреляции между ошибками определения изотопных отношений $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ и $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$.

Note. Error in the calibration standard is 0.15%. $^{206}\text{Pb}_c$ and $^{206}\text{Pb}^*$ — common and radiogenic lead. Isotope ratios and $^{206}\text{Pb}^*$ content are corrected using measured ^{204}Pb . D is discordance: $D = 100 \times [\text{age} (^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb})/\text{age} (^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}) - 1]$. Rho is the error correlation coefficient of $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ versus $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$.

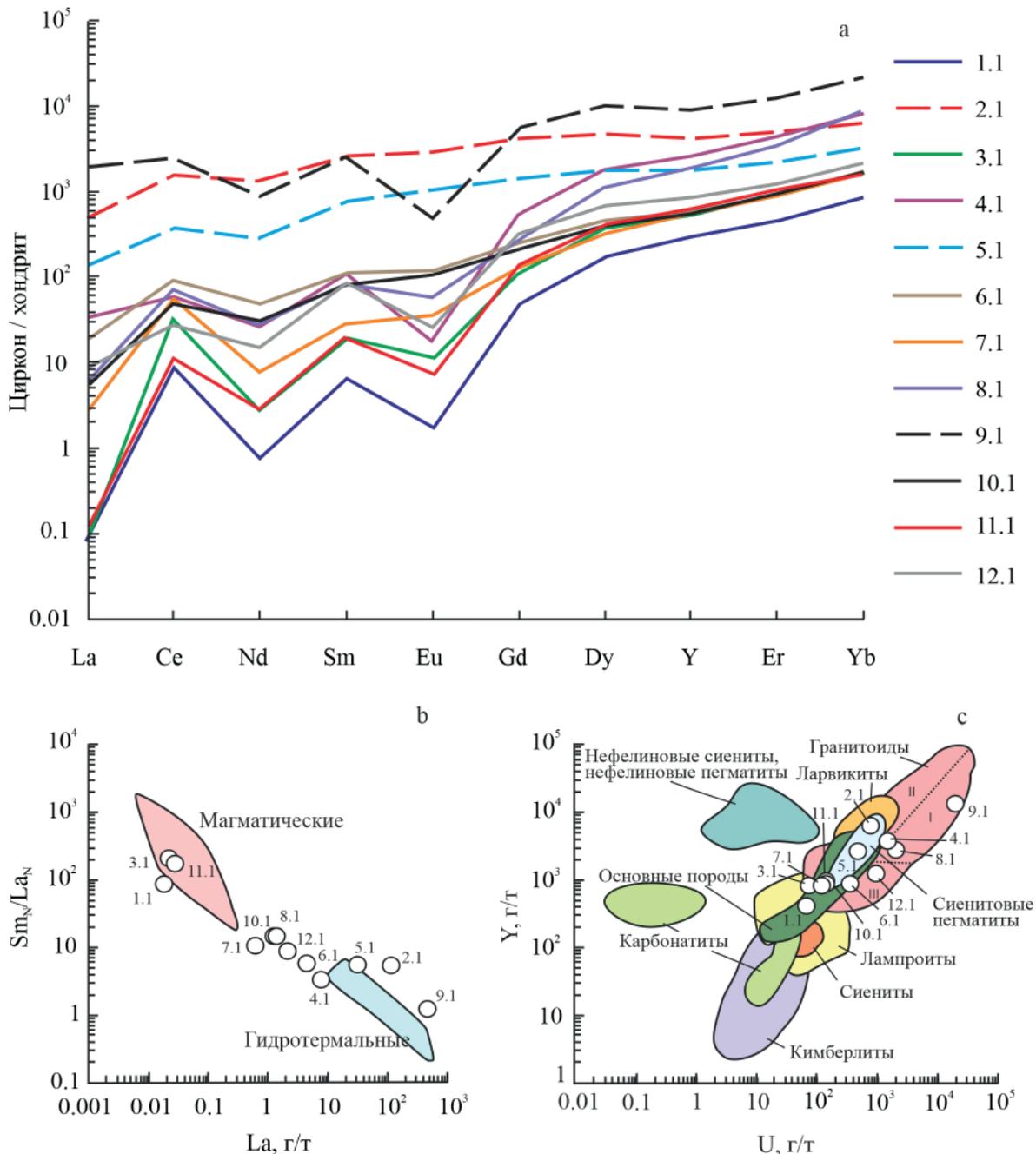


Рис. 6. Диаграммы, иллюстрирующие особенности состава изученных зерен циркона: а — график распределения REE, концентрации нормированы к составу хондрита CI (Sun, McDonough, 1989); б — $Sm_N/La_N - La$ (Hoskin, 2005); в — $Y-U$, поле состава циркона из гранитоидов включает области состава циркона из аплитов и лейкогранитов (I), гранитов (II), гранодиоритов и тоналитов (III) (Belousova et al., 2002). Номера зерен соответствуют таковым в табл. 4 и 5

Fig. 6. Diagrams illustrating the compositional features of the studied zircon grains: а — chondrite-normalized (Sun, McDonough, 1989) REE chart; б — $Sm_N/La_N - La$ (Hoskin, 2005); в — $Y-U$, the compositional field of zircon from granitoids includes zircon from aplites and leucogranites (I), granites (II), granodiorites and tonalites (III) (Belousova et al., 2002). Grain numbers correspond to the numbers in Tables 4 and 5

цирконов (анализы 2.1., 5.1 и 9.1), для которых этот метод расчета неприменим, остальные зерна показали интервал температур 724–875 °С.

Температура насыщения расплава цирконием для продатированного гранита из скв. 1-Сосьянская (обр. 28) составляет 804 °С, а для гранита из скв. 1-Южная Болотная (обр. 23-3) — 664 °С (рис. 7), но, учитывая, что в породах много зерен унаследованного циркона, рассчитанные температуры, вероятно, завышены, что типично для гранитоидов, в составе которых отмечаются реликты детритовых цирконов (Hanchar, Watson, 2003).

⁴⁰Ar-³⁹Ar-возраст мусковита

Для установления возраста гранитов было проведено ⁴⁰Ar-³⁹Ar-датирование мономинеральных фракций мусковита из гранитов скважин 1-Южная Болотная и 1-Сосьянская, отобранных из тех же образцов, из которых датировались цирконовые зерна.

В возрастном ⁴⁰Ar-³⁹Ar-спектре мусковита из гранитов скв. 1-Южная Болотная (рис. 8, а) выделяется кондиционное плато, хорошо выраженное в средне- и высокотемпературной областях, которое отвечает средневзвешенному возрасту 548 ± 7 млн лет. По результа-



Таблица 5. Содержание элементов-примесей в цирконе из гранитов скв. 1-Сосьянская, г/т

Table 5. Trace element contents in zircon from granites of 1-Sosyanskaya borehole, ppm

Зерно, точка Grain, spot	1.1	2.1	3.1	4.1	5.1	6.1	7.1	8.1	9.1	10.1	11.1	12.1
La	0.02	114.40	0.02	7.67	31.81	4.41	0.63	1.38	463.86	1.25	0.03	2.09
Ce	5	940	19	37	226	53	35	43	1530	29	6	17
Nd	0.4	622.7	1.3	12.1	130.6	22.0	3.5	11.7	384.3	14.8	1.3	7.3
Sm	1.0	394.6	2.9	16.3	115.8	16.2	4.3	13.0	373.5	11.7	3.0	12.0
Eu	0.10	168.36	0.66	1.01	59.50	7.14	2.00	3.27	26.95	6.24	0.40	1.47
Gd	10	871	23	104	295	50	26	54	1156	42	27	62
Dy	43	1186	88	451	457	115	81	274	2578	102	99	168
Y	443	6516	865	3968	2742	919	854	2912	13919	846	979	1335
Er	76	795	154	734	370	148	143	568	2011	145	169	200
Yb	143	1071	265	1361	539	283	274	1448	3675	283	278	352
Hf	9532	12546	8138	13033	8669	10606	7779	18014	27784	8541	8384	10280
Fe	1	5411	4	6749	1047	168	4	5445	31852	149	2	1876
⁴⁸ Ti	12.3	249.5	13.5	5.3	70.2	16.6	11.6	3.9	58.8	15.0	13.8	13.0
T, °C	840	1324	851	753	1077	875	833	724	1048	863	853	846
Eu _N /Eu _N *	0.06	0.85	0.18	0.06	0.94	0.71	0.45	0.33	0.12	0.77	0.09	0.13
Sm _N /La _N	84.72	5.34	210.98	3.28	5.64	5.70	10.53	14.56	1.25	14.53	172.22	8.88
Yb _N /Gd _N	18.0	1.5	14.1	15.8	2.2	6.9	12.8	32.7	3.8	8.2	12.4	6.9

там ⁴⁰Ar-³⁹Ar-датирования мусковита из гранитов скв. 1-Сосьянская средневзвешенный возраст по плато составил 565 ± 7 млн лет (рис. 8, b). Сопоставимость этих датировок с возрастными цирконов из гранитов других скважин свидетельствует о том, что полученные Ar-Ar-возрасты соответствуют времени образования гранитов.

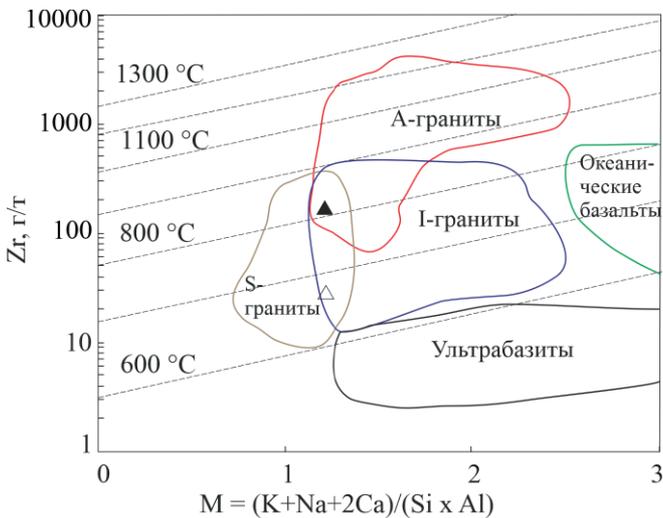


Рис. 7. Концентрация насыщения расплавов цирконием в зависимости от состава расплава при различных температурах (по: Костицын и др., 2015; Hanchar, Watson, 2003). Поля составов гранитов S-, I- и A-типов, океанических базальтов и ультраосновных пород очерчены по данным (Костицын и др., 2015). Усл. обозн. — на рис. 3

Fig. 7. Zirconium saturation in melts at different temperatures as a function of melt composition, after (Kostitsyn et al., 2015; Hanchar and Watson, 2003). Composition fields for S-, I-, and A-type granites, oceanic basalts, and ultramafic rocks are plotted using (Kostitsyn et al., 2015). Legend — see Fig. 3

Обсуждение результатов

Двуслюдяные граниты, вскрытые скважинами 1-Сосьянская и 1-Южная Болотная в фундаменте Ижемской зоны Печорской синеклизы по минеральному и химическому составу наиболее близки к гранитоидам S-типа, образующимся за счет частичного плавления метаосадочного субстрата.

Породы содержат мусковит, образующий как сростки с биотитом, так и включения в плагиоклазе и, по-видимому, являющийся магматическим. Для гранитов из обеих скважин характерны высокожелезистый и высокоглиноземистый биотит, обычный в S-гранитах (рис. 9), и типичные для подобных пород монацит и апатит.

Исследованные граниты характеризуются повышенной щелочностью и глиноземистостью, обогащены K и R и обеднены Ti, Mg и Ca. Магмы, из которых кристаллизуются граниты подобного состава, возникают при частичном плавлении преимущественно метапелитового субстрата (рис. 10, a). На диаграмме Дж. Маеды фигуративные точки состава гранитов из обеих скважин располагаются в поле гранитов S-типа (рис. 10, b), а на графике зависимости концентрации циркония в расплаве от состава и температуры магмы (рис. 7) попадают в области перекрытия полей составов гранитов: S- и I- типов (скв. 1-Южная Болотная), S-, I- и A-типов (скв. 1-Сосьянская).

Принадлежность рассматриваемых двуслюдяных высокоглиноземистых гранитов к S-типу, геохимические особенности пород, такие как обогащенность пород крупноионными литофильными элементами и обедненность высокозарядными элементами, преобладание LREE над HREE, свидетельствуют о вероятной связи гранитов, вскрытых скважинами 1-Южная Болотная и 1-Сосьянская, с коллизионными процессами.

Точки состава гранитов из скв. 1-Южная Болотная и 1-Сосьянская на диаграмме R1-R2 (рис. 11) группи-

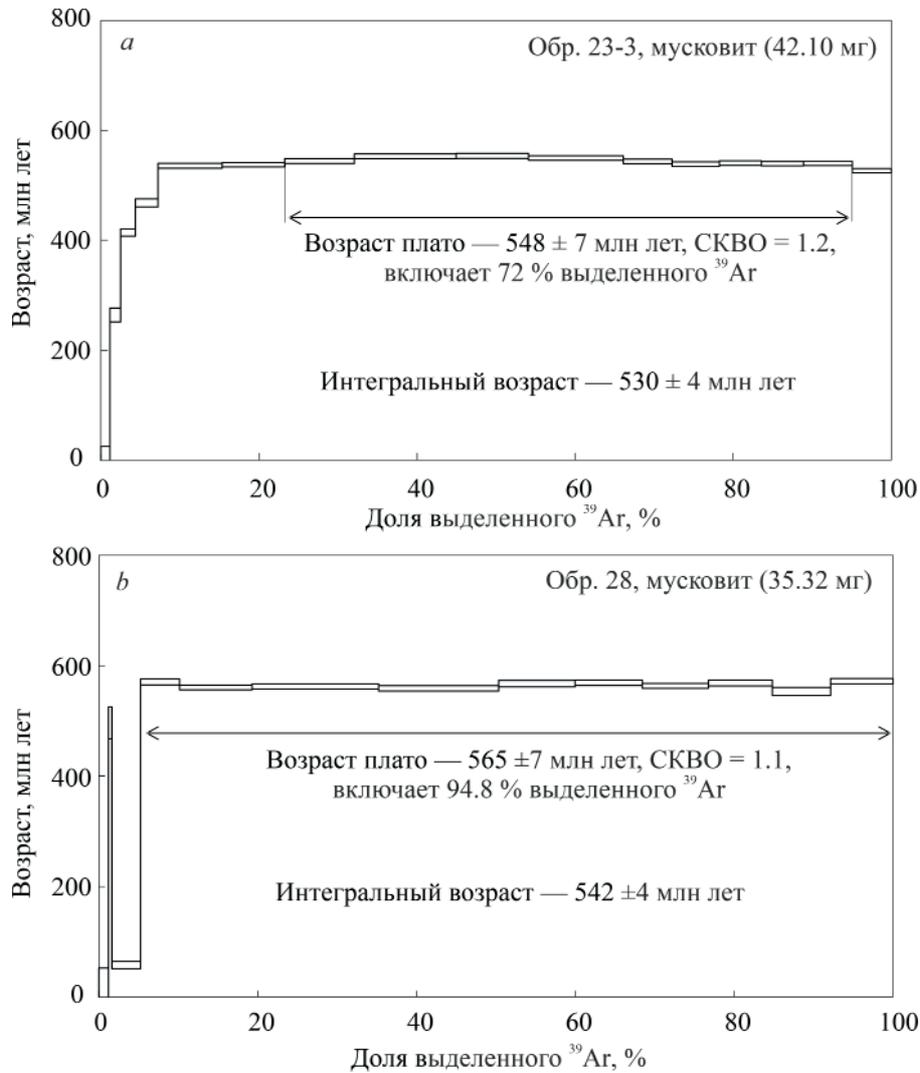


Рис. 8. Результаты $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датирования мономинеральных фракций мусковита из гранитов скважин 1-Южная Болотная (а) и 1-Сосьянская (b). Погрешности соответствуют 1σ

Fig. 8. Results of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of monomineral fractions of muscovite from granites of the 1-Yuzhnaya Bolotnaya (a) and 1-Sosyanskaya (b) boreholes. Errors are 1σ

руются в пределах области составов синколлизионных гранитоидов и вблизи этого поля. На диаграммах Дж. Пирса, применяемых для установления геодинамических обстановок формирования гранитоидов, точки состава продатированных пород попадают в поля островодужных и синколлизионных гранитов.

Попытки датирования зерен циркона из гранитов обеих скважин не привели к определенности, так как из-за относительно невысокой температуры гранитного расплава, формирующего S-граниты (Charpell, White, 2001), в породе сохраняется большое количество унаследованных цирконов разного возраста (табл. 4) и состава (табл. 5, рис. 6). Разброс цирконовых возрастов столь велик, что говорить о выделении какой-то когерентной группы, отвечающей возрасту гранитов, не приходится. Нет ни одной датировки, сопоставимой с возрастом синколлизионных гранитоидов (544–555 млн лет), локализованных вблизи Припечорской зоны разломов и наиболее приближенных к сосьянским гранитам (рис. 1). $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ -возрасты (млн лет), полученные в аналитических точках 9.1 (252 ± 3), 4.1 (358 ± 3) и 12.1 (457 ± 5) трудно увязать с какими-либо эндогенными событиями в эволюции Тиманского

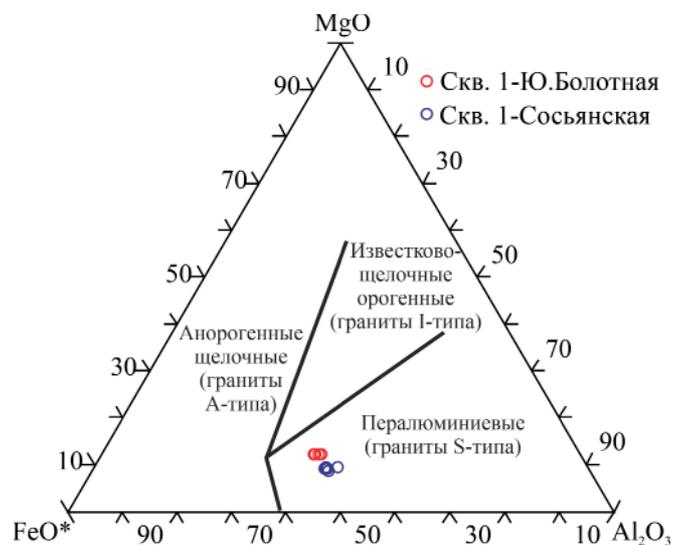


Рис. 9. Состав биотита из гранитов. Основа диаграммы по: Abdel-Rahman, 1994

Fig. 9. Composition of biotite from granites. Diagram based on Abdel-Rahman, 1994

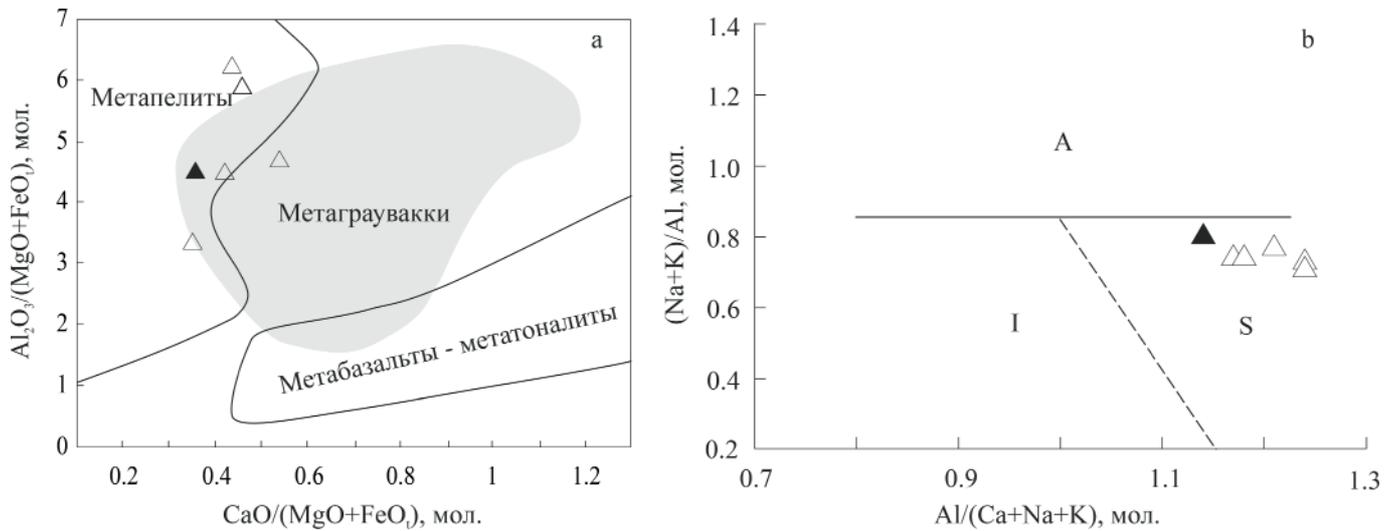


Рис. 10. Диаграммы для определения состава субстрата гранитов: *a* — показаны поля составов частичных расплавов, полученных экспериментально при плавлении различных пород (Altherr et al., 2000); *b* — разграничены поля составов гранитоидов А-, S- и I-типов (по: Maeda, 1990). Усл. обозн. — на рис. 3

Fig. 10. Diagrams for determining the composition of the granite substratum: *a* — fields of denote compositions of partial melts obtained in experimental studies by melting of various bulk compositions (Altherr et al., 2000); *b* — the composition fields of A-, S-, and I-type granitoids according (to Maeda, 1990). Legend — see Fig. 3

мегаблока, поскольку магматические объекты такого возраста не выявлены. Условно их появление может быть связано с тектономагматическими событиями, происходившими в это время на Среднем Тимане. Так, возраст, полученный в точке 9.1, сопоставим с K-Ar-возрастом ультракалийевых трахитов, составляющим 271–288 млн лет (Мальков, 1999), а в точке 4.1 — с K-Ar-возрастом девонских трахитов, равным 365 ± 8 млн лет (Шуйский и др., 2023). $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ -возрасты, установленные в аналитических точках 2.1 и 8.1 (617 ± 19 и 629 ± 19 млн лет соответственно), немного древнее датировок цирконов из скв. 1-Нижняя Омра (602 ± 2 млн лет) и скв. 1-Прилуцкая (593 ± 14 млн лет), расположенных в юго-восточной части Ижемской зоны (рис. 1).

Более половины зерен циркона из гранитов скв. 1-Сосьянская, показавшие возрасты более 1 млрд лет, как и цирконы в гранитах скв. 1-Южная Болотная (Андреичев и др., 2014б), по-видимому, унаследованы из гранитообразующего субстрата, в качестве которого служили вскрытые скважинами метатерригенные породы фундамента Ижемской зоны. Эти породы не охарактеризованы U-Pb-возрастными данными по детритовым цирконам, но сопоставимость по составу пород Ижемской зоны с выходящими на поверхность сланцами Тимана (Белякова и др., 2008 и ссылки в ней), для которых эти данные имеются (Андреичев и др., 2014а; 2017б; 2018; Удоратина и др., 2017; Соболева и др., 2019; Брусницына и др., 2021), позволяет распространять их на породы Ижемской зоны. Таким образом, соотносимость возрастов древних цирконов из гранитов скв. 1-Сосьянская с цирконовыми датировками метаосадочных пород Тимана свидетельствуют о том, что формирование кластических осадков, слагающих верхнедевонский фундамент Тиманского мегаблока, происходило за счет накопления продуктов эрозии одних и тех же источников сноса, каковыми являлись в то время породные комплексы, аналогичные наблюдаемым ныне на Фенноскандинавском

щите, и, возможно, комплексы Среднерусского орогена, образовавшегося в результате сочленения в конце раннего протерозоя (1.8–1.7 млрд лет) архейско-нижнепротерозойских литосферных мегаблоков Волго-Сарматии и Фенноскандии (Бибикина и др., 1995; Богданова и др., 2006; Claesson et al., 2001; Bogdanova et al., 2008).

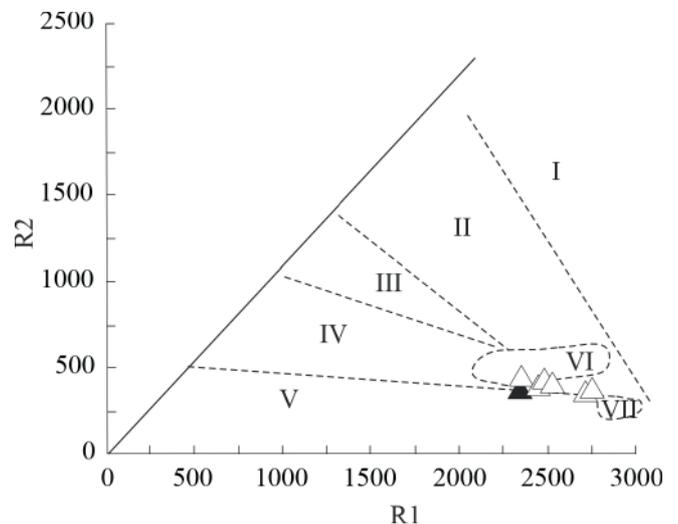


Рис. 11. Мультипликационная диаграмма R1–R2 (Batchelor, Bowden, 1985). Поля составов гранитоидов: I — дифференциатов мантийных магм, II — надсубдукционных, III — постколлизийных поднятий, IV — позднеорогенных, V — анорогенных, VI — синколлизийных, VII — посторогенных. $R1 = 4\text{Si} - 11(\text{Na} + \text{K}) - 2(\text{Fe} + \text{Ti})$, $R2 = 6\text{Ca} + 2\text{Mg} + \text{Al}$. Усл. обозн. — см. рис. 3

Fig. 11. Multiplication diagram R1–R2 (Batchelor, Bowden, 1985). Compositional fields of the major granitoid associations: I — mantle fractionates, II — pre-plate collision, III — post-collision uplift, IV — late orogenic, V — anorogenic, VI — syn-collision, VII — post-orogenic. $R1 = 4\text{Si} - 11(\text{Na} + \text{K}) - 2(\text{Fe} + \text{Ti})$, $R2 = 6\text{Ca} + 2\text{Mg} + \text{Al}$. Legend — see Fig. 3

Температура закрытия K/Ar изотопной системы мусковита составляет порядка 370 °C (Hodges, 2004). Это означает, что датировка по мусковиту магматического парагенезиса фиксирует время, когда произошло остывание гранита до температур ниже 370 °C. В случае формирования небольших гранитных тел остывание происходит достаточно быстро, в пределах первых миллионов лет, что не превышает ошибки определения ^{40}Ar - ^{39}Ar -возраста.

Цифры ^{40}Ar - ^{39}Ar -возрастов мусковита из гранитов скважин 1-Сосьянская (565 ± 7 млн лет) и 1-Южная Болотная (548 ± 7 млн лет) оказались близки и сопоставимы с U-Pb (SIMS SHRIMP-IIe и SHRIMP-RG)-результатами по цирконам из гранитоидов других зон фундамента Печорской синеклизы. Это свидетельствует о том, что полученные аргоновые датировки являются хорошей оценкой возраста кристаллизации S-гранитов, образовавшихся наряду с другими гранитоидами фундамента Печорской синеклизы в позднем венде при коллизионных процессах на завершающей фазе тиманского тектогенеза.

Исследование выполнено по теме «Глубинное строение, геодинамическая эволюция, взаимодействие геосфер, магматизм, метаморфизм, изотопная геохронология Тимано-Североуральского сегмента литосферы» ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (ГР № 122040600012-2) с частичной поддержкой в рамках темы государственного задания ИГТ УрО РАН (ГР № 123011800013-6). ^{40}Ar - ^{39}Ar -датирование выполнено в рамках темы государственного задания ИГМ СО РАН (122041400171-5).

Литература / References

- Акимова Г. Н. Геохронология докембрия Тимана // Сов. геология. 1980. № 12. С. 71–85.
- Akimova G. N. Geochronology of the Precambrian of Timan. Sov. geology, 1980, No. 12, pp. 71–85. (in Russian)
- Андреичев В. Л., Литвиненко А. Ф. Изотопная геохронология гранитоидного магматизма фундамента Печорской синеклизы. Сыктывкар: Геопринт, 2007. 68 с.
- Andreichev V. L., Litvinenko A. F. Isotopic geochronology of granitoid magmatism in the basement of the Pechora Basin. Syktyvkar: Geoprint, 2007, 68 p. (in Russian)
- Андреичев В. Л., Соболева А. А., Герелс Дж. U-Pb-возраст и источники сноса обломочных цирконов из верхнедокембрийских отложений Северного Тимана // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2014а. Т. 22. № 2, С. 32–45. DOI: 10.7868/S0869592X14020021
- Andreichev V. L., Soboleva A. A., Gehrels G. U-Pb dating and provenance of detrital zircons from the Upper Precambrian deposits of North Timan. Stratigraphy and Geological Correlation, 2014a, V. 22, No. 2, pp. 147–159. DOI: 10.1134/S0869593814020026
- Андреичев В. Л., Соболева А. А., Довжикова Е. Г. Первые U-Pb-данные о возрасте гранитоидного магматизма фундамента Печорской синеклизы // ДАН. 2014б. Т. 458. № 5. С. 559–566. DOI: 10.7868/S0869565214290192
- Andreichev V. L., Soboleva A. A., Dovzhikova E. G. First U-Pb Data on Age of Granitoids in the Basement of the Pechora Basin. Doklady Earth Sciences, 2014b, V. 458, Part 2, pp. 1207–1214. DOI: 10.1134/S1028334X14100146
- Андреичев В. Л., Соболева А. А., Довжикова Е. Г., Миллер Э. Л., Кобл М. А., Ларионов А. Н., Вакуленко О. В., Сергеев С. А. Возраст гранитоидов Припечорской разломной зоны фундамента Печорской синеклизы: первые U-Pb (SIMS)-данные // ДАН. 2017а. Т. 474. № 3. С. 321–326. DOI: 10.7868/S0869565217150129
- Andreichev V. L., Soboleva A. A., Dovzhikova E. G., Miller E. L., Coble M. A., Larionov A. N., Vakulenko O. V., Sergeev S. A. Age of granitoids in the Pripechora fault zone of the basement of Pechora Basin: First U-Pb (SIMS)-data. Doklady Earth Sciences, 2017a, V. 474, issue 1, pp. 498–502. DOI: 10.1134/S1028334X17050191
- Андреичев В. Л., Соболева А. А., Хоуриган Дж. К. Результаты U-Pb (LA-ICP-MS)-датирования детритовых цирконов из терригенных отложений верхней части докембрийского фундамента Северного Тимана // Бюл. МОИП. Отд. геол. 2017б. Т. 92, вып. 1. С. 10–20.
- Andreichev V. L., Soboleva A. A., Hourigan J. K. U-Pb (LAICP-MS) dating of detrital zircons from clastic sediments of upper part of Precambrian basement of Northern Timan. Bulletin of Moscow Society of Naturalists, Geological Series, 2017b, V. 92, part 1, pp. 10–20. (in Russian)
- Андреичев В. Л., Соболева А. А., Хубанов В. Б., Соболев И. Д. U-Pb (LA-ICP-MS)-возраст детритовых цирконов из метаосадочных пород основания верхнедокембрийского разреза Северного Тимана // Бюл. МОИП. Отд. геол. 2018. Т. 93, вып. 2. С. 14–26.
- Andreichev V. L., Soboleva A. A., Khubanov V. B., Sobolev I. D. U-Pb (LA-ICP-MS) dating of detrital zircons from clastic sediments composing lowest part of Precambrian sequence of Northern Timan. Bulletin of Moscow Society of Naturalists, Geological Series, 2018, V. 93, No. 2, pp. 14–26. (in Russian)
- Андреичев В. Л., Соболева А. А., Довжикова Е. Г., Ронкин Ю. Л. Два эпизода надсубдукционного интрузивного магматизма в пределах Печорской зоны фундамента Печорской синеклизы // Вестник геонаук. 2023а. 10 (346). С. 15–25. DOI: 10.19110/geov.2023.10.2
- Andreichev V. L., Soboleva A. A., Dovzhikova E. G., Ronkin Yu. L. Two episodes of subduction-related intrusive magmatism within the Pechora zone of the Pechora Basin basement. Vestnik of Geosciences, 2023, No. 10 (346), pp. 15–25. (in Russian)
- Андреичев В. Л., Соболева А. А., Довжикова Е. Г., Ронкин Ю. Л., Миллер Э. Л., Кобл М. А. Гранитоиды Большеземельской зоны фундамента Печорской синеклизы: состав и U-Pb-возраст // Геология и геофизика, 2023б. Т. 64, № 2. С. 180–191. DOI: 10.15372/GiG2022125
- Andreichev V. L., Soboleva A. A., Dovzhikova E. G., Ronkin Yu. L., Miller E. L., Coble M. A. Granitoids in the Bolshezemel zone of the Pechora Basin basement: composition and U-Pb age. Russian Geology and Geophysics, 2023, V. 64, No. 2, pp. 148–157. DOI: 10.2113/RGG 20224436
- Андреичев В. Л., Соболева А. А., Довжикова Е. Г., Ронкин Ю. Л., Ларионов А. Н., Сергеев С. А., Миллер Э. Л., Кобл М. А. U-Pb (SIMS) цирконовая хронология интрузивного магматизма юго-восточной части Ижемской зоны фундамента Печорской синеклизы // Вестник геонаук. 2024. 11 (359). С. 14–29. DOI: 10.19110/geov.2024.11.2
- Andreichev V. L., Soboleva A. A., Dovzhikova E. G., Ronkin Yu. L., Larionov A. N., Sergeev S. A., Miller E. L., Coble M. A. U-Pb (SIMS) zircon chronology of intrusive magmatism of the south-eastern part of the Izhma zone (basement of Pechora Basin). Vestnik of Geosciences, 2024, No. 11 (359), pp. 14–29. (in Russian)



- Белякова Л. Т. Строение фундамента Ижма-Печорской впадины и Большеземельского мегаблока // Верхний докембрий севера европейской части СССР. Сыктывкар, 1983. С. 72—75. Деп. в ВИНТИ. № 1155—84.
- Belyakova L. T. Structure of the basement of the Izhma-Pechora depression and the Bolshezemelsky megablock). Upper Precambrian of the North of the European part of the USSR). Syktyvkar, 1983, pp. 72—75. Dep. at VINITI. No. 1155—84. (in Russian)
- Белякова Л. Т. Стратиграфические подразделения Ижма-Омринского комплекса // Стратиграфия и литология нефтегазоносных отложений Тимано-Печорской провинции: Сб. науч. тр. Л., 1988. С. 17—22.
- Belyakova L. T. Stratigraphic subdivisions of the Izhma-Omrinsky complex. Stratigraphy and lithology of oil and gas deposits of the Timan-Pechora province collection of scientific papers. Leningrad, 1988, p. 17—22. (in Russian)
- Белякова Л. Т., Богацкий В. И., Богданов Б. П., Довжикова Е. Г., Ласкин В. М. Фундамент Тимано-Печорского нефтегазоносного бассейна. Ухта: ГУП РК ТП НИЦ, 2008. 288 с.
- Belyakova L. T., Bogatskij V. I., Bogdanov B. P., Dovzhikova E. G., Laskin V. M. The basement of the Timan-Pechora oil and gas basin. Uhta: TP SRC, 2008, 288 p. (in Russian)
- Белякова Л. Т., Степаненко В. И. Магматизм и геодинамика байкалид фундамента Печорской синеклизы // Изв. АН СССР. Сер. геол., 1991, № 12, с. 106—117.
- Belyakova L. T., Stepanenko V. I. Magmatism and geodynamics of the Baikaliide basement of the Pechora Basin. Proceedings USSR AS. Geological series, 1991, No. 12, pp. 106—117. (in Russian)
- Белякова Л. Т., Довжикова Е. Г. Новые данные по составу и возрасту фундамента Тимано-Печорской плиты // Структура и динамика литосферы Восточной Европы: Результаты исследований по программе EUROPROBE. М.: ГЕОКАРТ, ГЕОС, 2006. С. 510—520.
- Belyakova L. T., Dovzhikova E. G. New data on the composition and age of the Timan-Pechora plate basement. Structure and Dynamics of the Lithosphere of Eastern Europe. Results of Studies under the EUROPROBE Programme. Moscow: GEOKART, GEOS, 2006, pp. 510—520. (in Russian)
- Бибикова Е. В., Богданова С. В., Клаэссон С., Горбачев Р. М., Кирнозова Т. И. Изотопный возраст, природа и структура докембрийской коры в Беларуси // Стратиграфия. Геол. корреляция. 1995. Т. 3. № 6. С. 68—78.
- Bibikova E. V., Bogdanova S. V., Claesson S., Gorbatshev R., Kirnozova T. I. Age, nature and structure of the Precambrian crust in Belarus. Stratigraphy and Geological Correlation. Interperiodika. 1995, No. 6, pp. 591—601.
- Богданова С. В., Гарецкий П. Г., Каратаев Г. И. и др. Проект EUROBRIDGE: палеопротерозойская аккреция и коллизия коры в Фенноскандии и Сарматии. Геология и геофизические образы // Строение и динамика литосферы Восточной Европы: Результаты исследований по программе EUROPROBE: Очерки по региональной геологии России / Ред. Н. И. Павленкова М.: Роснедра: РАН, ГЕОКАРТ, 2006. С. 221—290.
- Bogdanova S. V., Garetsky R. G., Karataev G. I., et al. EUROBRIDGE Project: Paleoproterozoic crustal accretion and collision in Fennoscandia and Sarmatia. Geology and geophysical images. Structure and dynamics of the lithosphere of Eastern Europe: Results of studies on the EUROPROBE program: Essays on regional geology of Russia. Ed. Pavlenkova N. I. Moscow: ROSNEDRA, RAS, GEOKART, 2006, pp. 221—290. (in Russian)
- Борисова Е. Ю., Бибикова Е. В., Доброженецкая Л. Ф., Макаров В. А. Геохронологическое изучение циркона гранитогнейсов Кокчетавского алмазоносного района // Докл. РАН. 1995. Т. 343. № 6. С. 801—805.
- Borisova E. Yu., Bibikova E. V., Dobrozhnetskaya L. F., Makarov V. A. Geochronological study of zircon from granite-gneisses of the Kokchetav diamondiferous region. Doklady Earth Sciences, 1995, V. 343, No. 6, pp. 801—805. (in Russian)
- Брусницына Е. А., Ершова В. Б., Худoley А. К., Андерсон Т., Маслов А. В. Возраст и источники сноса пород четлаской серии (рифей) Среднего Тимана по результатам U-Th-Pb (LA-ICP-MS)-датирования обломочных цирконов // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2021. Т. 29. № 6. С. 3—23. DOI: 10.31857/S0869592X21060028
- Brusnitsyna E., Ershova V., Khudoley A., Andersen T., Maslov A. Age and provenance of the Riphean rocks of the Chetlas Group of the Middle Timan: U-Th-Pb (LAICP-MS) dating of detrital zircons. Stratigraphy and Geological Correlation, 2021, V. 29, No. 6, pp. 607—626. DOI: 10.1134/S0869593821060022
- Гафаров Р. А. О глубинном строении фундамента в зоне сочленения Восточно-Европейской платформы и Урала // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1970. № 8. С. 3—14.
- Gafarov R. A. On the deep structure of the basement in the junction zone of the East European Platform and the Urals. Proceedings of USSR AS. Geological series, 1970, No. 8, pp. 3—14. (in Russian)
- Гецен В. Г. Геодинамическая реконструкция развития северо-востока европейской части СССР для позднепротерозойского этапа // Геотектоника. 1991. № 5. С. 26—37.
- Getsen V. G. Geodynamic reconstruction of the development of the Northeast of the European part of the USSR for the Late Proterozoic stage. Geotectonics, 1991, No. 5, pp. 26—37. (in Russian)
- Дедеев В. А., Журавлев В. С., Запольнов А. К. Тиманская и Печорская складчатые системы // Структура фундамента платформенных областей СССР. Л.: Наука, 1974. С. 82—90.
- Dedeev V. A., Zhuravlev V. S., Zapol'nov A. K. Timan and Pechora fold systems. Structure of the basement of the platform regions of the USSR. Leningrad: Nauka, 1974, pp. 82—90. (in Russian)
- Дедеев В. А., Запорожцева И. В. Земная кора Европейского Северо-Востока СССР. Л.: Наука, 1985, 98 с.
- Dedeev V. A., Zaporozhtseva I. V. The Earth's crust of the European North-East of the USSR. Leningrad: Nauka, 1985, 98 p. (in Russian)
- Костицын Ю. А., Белоусова Е. А., Силантьев С. А., Бортников Н. С., Аносова М. О. Современные проблемы геохимических и U-Pb геохронологических исследований циркона в океанических породах // Геохимия. 2015. № 9. С. 771—800. DOI: 10.7868/S0016752515090022
- Kostitsyn Yu. A., Belousova E. A., Silant'ev S. A., Bortnikov N. S., Anosova M. O. Modern problems of geochemical and U-Pb geochronological studies of zircon in oceanic rocks. Geochem. Int., 2015, V. 53, No. 9, pp. 759—785. DOI:10.1134/S0016702915090025



- Мальков Б. А. Герцинский бостонитовый комплекс Среднего Тимана // Геология Европейского Севера России: Труды Института геологии Коми НЦ УрО РАН; Вып. 103. № 4. Сыктывкар, 1999. С. 43—47.
Malkov B. A. Gertsinsky bostonite complex of the Middle Timan. Geology of the European North of Russia. Proceedings of the Institute of Geology of the Komi SC UB RAS. Issue 103, Syktyvkar, 1999, No. 4, pp. 43—47. (in Russian)
- Оловянишников В. Г., Бушуев А. С., Дохсаньянц Э. П. Структура зоны сочленения Русской и Печорской плит по геолого-геофизическим данным // Докл. РАН. 1996. Т. 351. № 4. С. 209—231.
Olovyanishnikov V. G., Bushuev A. S., Dokhsanyants E. P. The structure of the conjugation zone of the Russian and Pechora plates from geological and geophysical data. Doklady Earth Sciences, 1996, V. 351, No. 8, pp. 1228—1232.
- Пучков В. Н. Структурные связи Приполярного Урала и Русской платформы. Л.: Наука, 1975. 203 с.
Puchkov V. N. Structural connections between the Cis-Polar Urals and adjacent part of the East-European Platform. Leningrad: Nauka, 1975, 208 p.
- Пучков В. Н. Эволюция литосферы: от Печорского океана к Тиманскому орогену, от Палеоуральского океана к Уральскому орогену // Проблемы тектоники Центральной Азии. М.: ГЕОС, 2005. С. 309—342.
Puchkov V. N. Evolution of the lithosphere: from the Pechora Ocean to the Timan Orogen, from the Paleoural Ocean to the Ural Orogen. Problems of Tectonics of Central Asia. Moscow: GEOS, 2005, pp. 309—342. (in Russian)
- Решения Межведомственного стратиграфического совещания по ордовику и силуру Восточно-Европейской платформы (Ленинград, 1984 г.). Л.: ВСЕГЕИ, 1987. 114 с.
Decisions of the Interdepartmental Stratigraphic Meeting on the Ordovician and Silurian of the East European Platform (1984). Leningrad: VSEGEI, 1987, 114 p. (In Russian)
- Ронкин Ю. Л., Лепихина О. П., Голик С. В., Журавлев Д. З., Попова О. Ю. Мультиэлементный анализ геологических образцов кислотным разложением и окончанием на HR ICP-MS Element2 // Информационный сборник научных трудов ИГТ УрО РАН: Ежегодник-2004. Екатеринбург: ИГТ УрО РАН, 2005. С. 423—433.
Ronkin Yu. L., Lepikhina O. P., Golik S. V., Zhuravlev D. Z., Popova O. Yu. Multielement analysis of geological samples by acid decomposition and completion on HR ICPMS Element2. Information collection of scientific works of the Institute of Geography UB RAS: Yearbook 2004. Yekaterinburg: IGG UB RAS, 2005, pp. 423—433 (in Russian).
- Соболева А. А., Андричев В. Л., Бурцев И. Н., Никулова Н. Ю., Хубанов В. Б., Соболев И. Д. Детритовые цирконы из верхнедокембрийских пород вымской серии Среднего Тимана (U-Pb-возраст и источники сноса) // Бюл. МОИП. Отд. геол. 2019. Т. 94, вып. 1. С. 3—16.
Soboleva A. A., Andreichev V. L., Burtsev I. N., Nikulova N. Y., Khubanov V. B., Sobolev I. D. Detrital zircons from Upper Precambrian rocks of the Vym series of the Middle Timan (U-Pb age and sources of drift). Bulletin of Moscow Society of Naturalists, Geological Section, 2019, V. 94, No. 1, pp. 3—16. (in Russian)
- Соболева А. А., Андричев В. Л. Коллизионные магматические породы орогена Тиманид // Соотношение времени образования магматических формаций и рудных месторождений металлогенических провинций Евразии: IX Российская конференция по изотопной геохронологии. Материалы конференции. М.: ИГЕМ РАН, 2025. С. 196—198.
Soboleva A. A., Andreichev V. L. Collisional igneous rocks of the Timanides orogen // Relationship between ages of igneous formations and ore deposits in the metallogenic provinces of Eurasia: IX Russian Conference on Isotope Geochronology: Conference Proceedings. Moscow: IGEM RAS, 2025, pp. 196—198. (in Russian)
- Стратиграфический кодекс России. Издание третье. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2019. 96 с.
Stratigraphic Code of Russia. Third edition. St. Petersburg: VSEGEI Publishing House, 2019, 96 p. (in Russian)
- Тимано-Печорский седиментационный бассейн: Атлас геологических карт (литолого-фациальных, структурных и палеогеологических) / Н. И. Никонов, В. И. Богацкий, А. В. Мартынов и др. Ухта: Изд-во ТП НИЦ, 2000.
Timan-Pechora sedimentary basin. Atlas of geological maps (lithological-facial, structural and paleogeological). Eds. V. I. Bogatsky, Z. V. Larionova. Ukhta: TP SRC, 2000. (in Russian)
- Травин А. В., Юдин Д. С., Владимиров А. Г., Хромых С. В., Волкова Н. И., Мехоношин А. С., Колотилина Т. Б. Термохронология Чернорудской гранулитовой зоны (Ольхонский регион, Западное Прибайкалье) // Геохимия. 2009. № 11. С. 1181—1199.
Travin A. V., Yudin D. S., Vladimirov A. G., Khromykh S. V., Volkova N. I., Mekhonoshin A. S., Kolotilina T. B. Thermochronology of the Chernorud Granulite Zone, Ol'khon Region, Western Baikal Area. Geochemistry International, 2009, V. 47, No. 11, pp. 1107—1124. DOI: 10.1134/S0016702909110068
- Удоратина О. В., Бурцев И. Н., Никулова Н. Ю., Хубанов В. Б. Возраст метапесчаников верхнедокембрийской четласской серии Среднего Тимана на основании U-Pb-датирования детритных цирконов // Бюл. МОИП. Отд. геол. 2017. Т. 92, вып. 5. С. 15—32.
Udoratina O. V., Burtsev I. N., Nikulova N. Yu., Khubanov V. B. Age of metasediments of the Upper Precambrian Chetlas Series of the Middle Timan on the basis of U-Pb dating of detrital zircons. Bulletin of Moscow Society of Naturalists, Geological Section, 2017, V. 92, No. 5, pp. 15—32. (in Russian)
- Фишман М. В., Андричев В. Л., Естафьева А. Д. Каталог определений возраста горных пород СССР радиологическими методами (северо-восток европейской части СССР, север Урала, Пай-Хой, Новая Земля). Сыктывкар: Ин-т геологии Коми фил. АН СССР, 1981. 181 с. Деп. в ВИНТИ. № 531—82.
Fishman M. V., Andreychev V. L., Estafieva A. D. Catalogue of age determinations of rocks of the USSR by radiological methods (North-East of the European part of the USSR, North of the Urals, Pai-Khoi, Novaya Zemlya). Syktyvkar: Institute of Geology, Komi Branch of the Academy of Sciences of the USSR, 1981, 181 p. Dep. in VINITI. No. 531—82. (in Russian)
- Шуйский А. С., Куликова К. В., Удоратина О. В., Лебедев В. А. Позднедевонская плюмовая Цилемская дайка (Средний Тиман): обоснование геодинамической природы и



- возраста // Вестник геонаук. 2023. 12(348). С. 30–36. DOI: 10.19110/geov.2023.9.4
- Shuisky A. S., Kulikova K. V., Udoratina O. V., Lebedev V. A. Late Devonian plume Tsilemsky dyke (Middle Timan): composition and K-Ar age. *Vestnik of Geosciences*, 2023, No. 12(348), pp. 30–36. (in Russian)
- Abdel-Rahman A. F. M.* Nature of biotites from alkaline, calc-alkaline and peraluminous magmas // *Journal of Petrology*. 1994. V. 35 (2). P. 525–541. DOI: 10.1093/ptrology/35.2.525
- Altherr R., Holl A., Hegner E., Langer C., Kreuzer H.* High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany) // *Lithos*. 2000. V. 50. P. 51–73. DOI: 10.4236/ojped.2015.52023 2 654
- Batchelor R. A., Bowden P.* Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters // *Chemical Geology*. 1985. V. 48. P. 43–55. DOI: 10.1016/0009-2541(85)90034-8
- Belousova, E., Griffin, W. L., O'Reilly, S. Y., Fisher, N. L.*, Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2002. V. 143 (5). P. 602–622. DOI: 10.1007/s00410-002-0364-7
- Black L. P., Kamo S. L., Allen C. M., Aleinikoff J. N., Davis D. W., Korsch R. J., Foudoulis C.* TEMORA 1: A new zircon standard for Phanerozoic U–Pb geochronology // *Chem. Geol.* 2003. V. 200. P. 155–170. DOI: 10.1016/S0009-2541(03)00165-7
- Bogdanova S.V., Bingen B., Gorbatshev R. et al.* The East European Craton (Baltica) before and during the assembly of Rodinia // *Precambrian Res.* 2008. V. 160. P. 23–45.
- Chappell B. W., White A. J. R.* Two contrasting granite types: 25 years later. *Australian Journal of Earth Sciences*. 2001. V. 48. P. 489–499. DOI: 10.1046/j.1440-0952.2001.00882.x
- Claesson S., Bogdanova S.V., Bibikova E.V., Gorbatshev R.* Isotopic evidence of Palaeoproterozoic accretion in the basement of the East European Craton // *Tectonophysics*. 2001. V. 339. P. 1–18.
- Coble M. A., Vazquez J., Barth A. P., Wooden J., Burns D., Kylander-Clark A., Jackson S., Vennari C. E.* Trace element characterization of MAD-559 zircon reference Material for ion microprobe analysis. *Geostandards and Geoanalytical Research*. 2018, V. 42. P. 481–497. DOI: 10.1111/ggr.12238.
- Gee D. G., Beliakova L., Pease V., Larionov A., Dovzhikova E.* New, Single Zircon (Pb-Evaporation) Ages from Vendian Intrusions in the Basement beneath the Pechora Basin, Northeastern Baltica // *Polarforschung*. 2000. V. 68. P. 161–170. DOI: 10.2312/polarforschung.68.16.
- Hanchar J.M., Watson E.B.* Zircon saturation thermometry // *Rev. Mineral. Geochem.* 2003. V. 53. No. 1. P. 89–112. DOI:10.2113/0530089
- Hodges K.V.* Geochronology and thermochronology in orogenic systems // *Treatise on Geochemistry*. Oxford, Elsevier, 2004. P. 263–292. DOI: 10.1016/B0-08-043751-6/03024-3
- Hoskin P. W. O.* Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2005. V. 69. P. 637–648. DOI: 10.1016/j.gca.2004.07.006
- Ireland T. R., Gibson G. M.* SHRIMP monazite and zircon geochronology of high-grade metamorphism in New Zealand // *J. Metamorphic Geol.* 1998. V. 16. P. 149–167. DOI: 10.1111/j.1525-1314.1998.00112.x
- Le Maitre R. W. A.* Classification of igneous rocks and glossary of terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences, Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. Oxford, Blackwell, 1989. 193 p.
- Ludwig K. R.* SQUID 2 – A User's Manual, rev. 12 Apr, 2009 // Berkeley Geochronology Center Special Publication. 2009. No. 5. 110 p.
- Maeda J.* Opening of the Kuril Basin deduced from the magmatic history of central Hokkaido, North Japan // *Tectonophysics*. 1990. V. 174. P. 235–255. DOI: 10.1016/0040-1951(90)90324-2
- Maniar P. D., Piccoli P. M.* Tectonic discrimination of granitoids // *Geol. Soc. Am. Bull.* 1989. V. 101 (5). P. 635–643. DOI: 10.1130/0016-7606(1989)101<0635:TDOG>2.3.CO;2
- O'Connor J. T. A.* A classification for quartz-rich igneous rock based on feldspar ratios // *U.S. Surv. Prof. Paper*. 1965. V. 52B. P. B79–B84.
- Pearce J. A., Harris N. B. W., Tindle A. G.* Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks // *Journal of Petrology*. 1984. V. 25. Issue 4. P. 956–983. DOI: 10.1093/ptrology/25.4.956.
- Rickwood P. C.* Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides and minor elements // *Lithos*. 1989. V. 22. P. 247–263. DOI: 10.1016/0024-4937(89)90028-5
- Sun S.-s., McDonough W.F.* Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: *Magmatism in the ocean basins*. Geological Society, Colorado, USA, Special publication, 1989? V. 42, P. 313–345. DOI:10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19
- Watson E. B., Wark D. A., Thomas J. B.* Crystallization Thermometers for Zircon and Rutile // *Contribution to Mineralogy and Petrology*. 2006. V. 151. P. 413–433. DOI: 10.1007/s00410-006-0068-5.

Поступила в редакцию / Received 29.10.2025