

Новые данные о возрасте циркона гранитов Адуйского массива

С. В. Прибавкин, М. Д. Вишнякова

Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, 620110, г. Екатеринбург,
ул. Академика Вонсовского, 15, e-mail: pribavkins@igg.uran.ru; VishniakovaMD@igg.uran.ru

Поступила в редакцию 21.06.2023 г., принята к печати 30.10.2023 г.

Объект исследования. Циркон гранитов западной контактной части Адуйского массива (Средний Урал). **Цель.** Получение новых U-Pb датировок и уточнение геохронологической модели формирования Адуйского гранитного массива. **Методы.** U-Pb датирование циркона на вторично-ионном микрозонде высокого разрешения SHRIMP-II (в ЦИИ ВСЕГЕИ, Санкт-Петербург). Определение петрогенных и рассеянных элементов на рентгенофлуоресцентных спектрометрах CPM-18, CPM-25, VRA-30 и масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой ELAN-9000. **Результаты.** Установлено, что по химическому составу жильные граниты в западной приконтактной зоне принадлежат породам гранит-лейкогранитовой формации, слагающим массив. Вмещающие их гнейсы обладают чертами сходства с гранитоидами габбро-тоналит-гранодиорит-гранитовой формации. Показано, что цирконы ортогнейсов имеют простое строение, близкое Th/U отношение (0.6) при широких вариациях содержания урана и тория. Их конкордантный возраст колеблется в интервале 290–270 млн лет. Такой широкий возрастной диапазон может быть связан с потерей свинца при метаморфизме. Циркон гранитов иной. Он состоит из ядер, часто обломочного облика, обрастающих каймой высокоуранового циркона. Ядра зерен циркона из ранних (пегматоидных) гранитов аналогичны зернам циркона из вмещающих ортогнейсов и могут интерпретироваться как захваченные из них. Ядра цирконовых зерен в поздних гранитах отличаются очень низким Th/U отношением (0.1) и широкими вариациями содержания U, их датировки образуют единый возрастной кластер со средним конкордантным возрастом 270 млн лет. Каймы, для которых характерны высокие концентрации U и низкие Th/U отношения, маркируют время формирования гранитов в интервале 265–250 млн лет. **Выводы.** Интерпретация новых и ранее опубликованных возрастных данных заключается в выделении длительного этапа метаморфизма и мигматизации вмещающих пород в диапазоне от 290 до 270 млн лет, предшествующего гранитообразованию. Завершение гранитообразования с формированием главных фаз Адуйского массива отвечало временному интервалу 265–250 млн лет.

Ключевые слова: геохронология, циркон, U-Pb возраст, Адуйский массив, Средний Урал

Источник финансирования

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИГГ УрО РАН, темы № 123011800009-9 с использованием оборудования ЦКП “Геоаналитик” ИГГ УрО РАН. Дооснащение и комплексное развитие ЦКП “Геоаналитик” ИГГ УрО РАН осуществляется при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение № 075-15-2021-680

New data on the zircon age of Adui pluton granites

Sergey V. Pribavkin, Maria D. Vishnyakova

A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS, 15 Academician Vonsovsky st.,
Ekaterinburg 620110, Russia, e-mails: pribavkins@igg.uran.ru; VishniakovaMD@igg.uran.ru

Received 21.06.2023, accepted 30.10.2023

Research subject. Zircon of granites in the western contact part of the Adui massif (Middle Urals). **Aim.** To obtain new U-Pb dating and to clarify the geochronological model of the Adui granite massif. **Methods.** U-Pb dating of zircon was established using a SHRIMP-II high-resolution secondary ion microprobe (VSEGEI Research Center, St. Petersburg). The major and trace elements were determined using SRM-18, SRM-25, and VRA-30 X-ray fluorescence spectrometers and an ELAN-9000 mass spectrometer with inductively coupled plasma. **Results.** In terms of chemical composition, the vein granites in the western contact zone belong to the rocks of the granite-leucogranite formation that make up the massif. Their hosting gneisses possess features similar to the granitoids of the gabbro-tonalite-granodiorite-granite formation. Zircons from orthogneisses were found to have a simple structure and a close Th/U ratio (0.6) with wide variations in uranium and thorium contents. Their concordant age ranges from 290–270 million years. Such a wide age range may be due to the loss of lead during metamorphism. The zircon of granites is different. It consists of cores, often clastic in appearance,

Для цитирования: Прибавкин С.В., Вишнякова М.Д. (2024) Новые данные о возрасте циркона гранитов Адуйского массива. *Литосфера*, 24(4), 675–685. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-4-675-685>

For citation: Pribavkin S.V., Vishnyakova M.D. (2024) New data on the zircon age of Adui pluton granites. *Lithosphere (Russia)*, 24(4), 675–685. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-4-675-685>

overgrown with a rim of high-uranium zircon. Zircon grain cores from early (pegmatoid) granites are similar to those from host orthogneiss and can be interpreted as captured from them. The cores of zircon grains in late granites are characterized by a rather low Th/U ratio (0.1) and wide variations in U contents; their dates form a single age cluster with an average concordant age of 270 Ma. The rims, which are characterized by high U concentrations and low Th/U ratios, mark the period of granite formation in the range of 265–250 million years. *Conclusions.* The interpretation of new and previously published age data consists in identifying a prolong stage of metamorphism and migmatization of the host rocks in the range from 290 to 270 million years, preceding granite formation. The completion of granite formation with the formation of the main phases of the Adui massif corresponded to a time interval of 265–250 million years.

Keywords: *geochronology, zircon, U-Pb age, Adui massif, Middle Urals*

Funding information

The research was carried out within the framework of the State assignment of the Institute of Geology and Geography, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, topic No. 123011800009-9, using the equipment of the "Geoanalitik" Center for Shared Use of the Institute of Geology and Geochemistry (IGG), Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Retrofitting and comprehensive development of the Geoanalitik Center for Shared Use is carried out with the financial support of a grant from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Agreement No. 075-15-2021-680

ВВЕДЕНИЕ

Адуйский массив является одним из крупнейших гранитных плутонов Среднего Урала, занимающая площадь около 550 км². Он расположен в 80 км на северо-восток от Екатеринбурга. С ним связаны месторождения Be, Ta, Nb, U, Th, керамических пегматитов, камнесамоцветного сырья (Золотов и др., 1990; Ферштатер, 2013; и др.). Несмотря на длительную историю изучения массива, остается ряд неразрешенных вопросов, касающихся состава протолита, условий плавления, сегрегации и кристаллизации гранитных расплавов, механизмов переноса и концентрации редких металлов. Актуальным является вопрос длительности процессов гранитообразования, начиная с мигматизации и анатексиса пород корового субстрата, заканчивая формированием больших объемов гранитов и многочисленных пегматитовых жил.

За последние десятилетия работы по определению времени формирования Адуйского гранитного массива предпринимались неоднократно. Их наиболее важным результатом стало установление характерной зональности циркона гранитов центральной и восточной частей массива, выраженной в наличии светлых ядер и темных кайм на катодолюминесцентных изображениях (Краснобаев и др., 2006; Ферштатер, 2013), позволившей выделить два пика магматической активности около 290 и 260–250 млн лет. В результате была предложена двухстадийная модель, согласно которой большая часть конкордантных датировок циркона отвечает времени раннего этапа мигматизации и плавления еще горячих позднепалеозойских гранодиоритов и тоналитов Каменского массива с максимумом 290 млн лет, а диапазон цирконовых возрастов 260–250 млн лет интерпретируется как время плавления допалеозойского метаморфического складчатого основания, на разогрев которого до темпера-

тур гранитообразования потребовалось 30–35 млн лет. Позднее подтверждением возможности такой двухстадийной модели стали результаты датирования каменноугольных диоритов, гранодиоритов (342–335 млн лет) и продуктов их плавления – гранитов, пегматоидных гранитов (308–283, 270 млн лет) в западной, переходной от гнейсов к гранитам, части Адуйского массива, выделенной в качестве Крутихинского массива (Вишнякова и др., 2018).

Задачей исследования являются датирование наиболее молодых гранитов западной части Адуйского массива и интерпретация ранее полученных геохронологических данных с целью уточнения времени становления массива. Для этого были датированы цирконы из гранитов, прорывающих как каменноугольные гранитоиды метаморфического основания, так и продукты их плавления (?) – пегматоидные граниты в западном контакте Адуя, вскрытом карьером в районе месторождения строительного камня Крутиха-2 (57°21.253' с. ш., 61°08.142' в. д., рис. 1).

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ АДУЙСКОГО МАССИВА

Адуйский массив вытянут в меридиональном направлении на 39 км. Его форма пластообразная, с падением на восток. Он сложен каликатровыми адаметеллитами, гранитами, лейкогранитами пермского возраста (Ферштатер, 2013), залегающими между докембрийскими кристаллическими сланцами, гнейсами и амфиболитами Мурзинско-Адуйского блока (МAB), выходящими на поверхность к западу от массива, и вулканогенно-осадочными комплексами PZ₁₋₂, расположенными восточнее (см. рис. 1). По мнению Г.Б. Ферштатера (2013), массив можно рассматривать как межформационный. Его строение многофазное. Согласно В.П. Олерскому с соавторами (1984), на западе преобладают породы

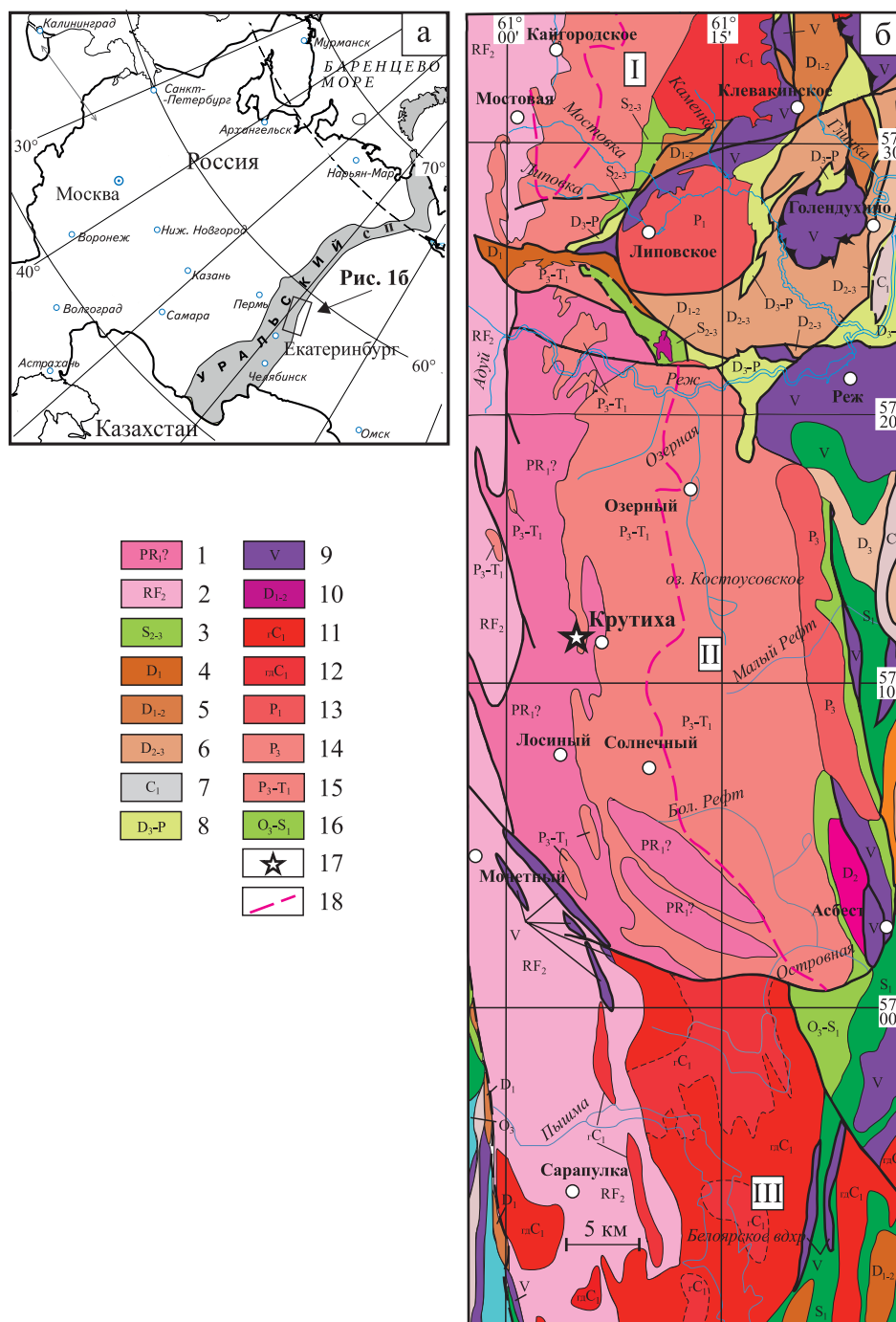


Рис. 1. Карта-врезка территории Уральского складчатого пояса (а), геологическая позиция Адуйского гранитного массива в составе Мурзинско-Адуйского метаморфического блока (Казаков, 2014, с изменениями) (б).

а – территория Уральского складчатого пояса обозначена серым цветом; площадь основного рисунка выделена черным прямоугольником.

б – метаморфические и магматические ассоциации: 1 – мигматит-гнейсовая ($PR_1?$); 2 – кристаллических сланцев, пара- и ортогнейсов (RF_2); 3 – терригенно-кремнистая (S_{2-3}); 4 – терригенно-карбонатная (D_1); 5 – карбонатно-терригенно-базальт-андезит-риолитовая (D_{1-2}); 6 – кремнисто-базальт-андезит-базальтовая (D_{2-3}); 7 – карбонатно-терригенно-базальт-риолитовая (C_1); 8 – меланж полимиктовый (D_3-P); 9 – дунит-гарцбургит-габбровая (v); 10 – диорит-плагиогранитовая (D_{1-2}); 11 – гранодиорит-гранитовая ($гC_1$); 12 – гранодиориты, тоналиты ($гдC_1$); 13 – монцодиорит-граносиенит-лейкогранитовая (P_1); 14 – субщелочные (монцодиорит-гранитные и гранитные) комплексы (P_3); 15 – гранитовая, гранит-лейкогранитовая (P_3-T_1); 16 – метабазальты афировые, мелкопорфировые, метаандезитовые, углеродисто-кварцевые сланцы (O_3-S_1); 17 – карьер Крутиха-2, место отбора проб (обр. 34, 38, 62 и 39); 18 – штриховая линия, разделяющая примерные области развития гранитов ватихского и мурзинского комплексов, Адуйского и Мурзинского массивов. Массивы: I – Мурзинский, II – Адуйский, III – Каменский.

Fig. 1. Inset map of the territory of the Ural Folded Belt (a), geological position of the Aduisky granite massif within the Murzinsko-Aduisky metamorphic block (Kazakov, 2014, with changes) (б).

a – the territory of the Ural Folded Belt is shown in gray; the area of the main picture is shown with a black rectangle.

б – metamorphic and magmatic associations: 1 – migmatite-gneiss (PR₁?); 2 – crystalline schists, para- and orthogneisses (RF₂); 3 – terrigenous-siliceous (S₂₋₃); 4 – terrigenous-carbonate (D₁); 5 – carbonate-terrigenous-basalt-andesite-rhyolite (D₁₋₂); 6 – siliceous-basalt-andesite-basalt (D₂₋₃); 7 – carbonate-terrigenous-basalt-rhyolitic (C₁); 8 – polymictic melange (D₃-P); 9 – dunite-harzburgite-gabbro (v); 10 – diorite-plagiogranite (D₁₋₂); 11 – granodiorite-granite (gC₁); 12 – granodiorites, tonalites (gdC₁); 13 – monzodiorite-granosyenite-leucogranite (P₁); 14 – subalkaline (monzodiorite-granite and granite) complexes (P₃); 15 – granite, granite-leucogranite (P₃-T₁); 16 – metabasalts aphyric, fine porphyritic, metaandesitic, carbonaceous-quartz schists (O₃-S₁); 17 – quarry Krutikha-2, sampling site (samples 34, 38, 62 and 39); 18 – dotted line separating the approximate areas of development of granites of the vatih and murzinsky complexes, Aduisky and Murzinsky massifs. Massifs: I – Murzinsky, II – Aduisky, III – Kamensky.

I фазы, представленные гнейсовидными адамеллитами, биотитовыми гранитами; на востоке доминируют массивные биотитовые, двуслюдяные граниты II фазы. Возможно выделение большего количества фаз, на что указывают материалы геологосъемочных работ М.С. Рапопорта, И.А. Медякова (1974), И.И. Казакова с соавторами (2014). Восточный контакт массива с породами палеозоя резкий, секущий. Западный контакт с вмещающими гнейсами имеет извилистые границы, осложненные перемежаемостью гнейсов с телами гранитов I фазы Адуйского массива, наличием скринов и линз гнейсов среди гранитов.

Западный контакт изучен нами в карьере месторождения Крутиха-2 (см. рис. 1). Ранее здесь было предложено выделять Крутихинский массив (Вишнякова и др., 2018), сложенный мигматизированными гранодиоритами каменноугольного возраста, прорванными продуктами их плавления – пегматоидными гранитами и лейкогранитами. Поскольку контуры данного массива не были установлены, а генетическая связь между гранодиоритами и секущими их гранитами требует доказательств, мы вернулись к интерпретации Крутихинского массива как краевой, экзоконтактовой части Адуя, сложенной ортогнейсами, прорванными обильными телами гранитов, доля которых достигает 40–60% объема.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выделение циркона включало дробление пробы до фракции менее 0.5 мм, промывку дробленого материала в воде до серого шлиха, магнитную сепарацию, разделение немагнитной фракции в тяжелых жидкостях по удельному весу, ручной отбор зерен под биноклем. U-Pb датирование цирконов выполнено с помощью прецизионного вторично-ионного микроанализатора высокого разрешения SHRIMP-II в ЦИИ ВСЕГЕИ (Санкт-Петербург) по методике (Williams, 1998), аналитик Н.В. Родионов. Концентрации петрогенных элементов определены на рентгенофлуоресцентных спектрометрах СРМ-18, СРМ-25, VRA-30 (аналитики Н.П. Горбунова, Л.А. Татарина, Г.С. Неупокоева), а рассеянных – на масс-спектрометре ICP-MS ELAN-9000 фирмы

Perkin Elmer (аналитики Д.В. Киселева, Н.В. Черденченко, Л.К. Дерюгина). Изучение состава породообразующих минералов из главных разновидностей пород массива выполнено на микроанализаторе Cameca SX100 и электронном сканирующем микроскопе JSM 6390LV в ЦКП “Геоаналитик” ИГГ УрО РАН.

ОСОБЕННОСТИ МИНЕРАЛЬНОГО И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОРОД

Наиболее древними породами в изученной нами зоне западного контакта Адуйского массива являются средне-крупнозернистые биотит-рогово-обманковые диоритогнейсы (обр. 34), переходящие в биотитовые гранодиоритогнейсы. Они содержат тела средне-мелкозернистых биотитовых гранитов гнейсовидного облика (гранитогнейсов) с элементами шлировых текстур (обр. 38). Простирание гнейсоватости северо-западное, падение крутое юго-восточное, совпадающее с ориентировкой деформационно-структурных элементов в МАБ. В составе диоритогнейсов преобладает плагиоклаз An₃₁₋₄₃, биотит (MgO/(MgO + FeO) или Mg# – 0.53–0.67 мол. %), кварц, иногда встречаются роговая обманка (Mg# – 0.59–0.64) и ортоклаз, в акцессорных количествах присутствуют апатит, титанит, циркон, магнетит. Гранитогнейсы состоят из кварца, плагиоклаза An₁₇₋₂₁ (иногда антипертитового строения), ортоклаза (реже ортоклаз-пертита), биотита (Mg# – 0.45–0.51), присутствуют циркон, апатит, титанит, редко мусковит, монацит, псевдобрукит, ильменит. С химическим составом породообразующих минералов этих и приведенных далее разновидностей пород можно ознакомиться в работе (Вишнякова и др., 2018).

Прорывающие гнейсы пегматоидные граниты (обр. 62 – пегматоидная разновидность, обогащенная калишпатом) имеют массивный или такситовый облик, варьируют от средне- до гигантозернистых разновидностей. Они образуют систему крутопадающих тел дайкообразной формы, вытянутых в меридиональном направлении вдоль контакта массива, пересекая гнейсоватость под острыми углами. Их количество возрастает на восток по мере приближения к массиву. В составе доминирует плагио-

клаз (An_{14-16} , иногда антипертитового строения), ортоклаз-пертит, кварц, биотит ($Mg\# = 0.46-0.48$); присутствуют мусковит, апатит, титанит, циркон, монацит, магнетит.

Тела мелкозернистых гранитов (обр. 39) секут все предыдущие разности пород. Они имеют гипидиоморфно-зернистую структуру, массивную текстуру, сложены слабо зональным плагиоклазом An_{16-24} , ортоклазом (иногда ортоклаз-микрклином), кварцем, биотитом ($Mg\# = 0.35-0.47$). На границах зерен плагиоклаза и щелочно-полевого шпата часто образуются мирмекиты. В небольшом количестве отмечаются мусковит, магнетит, псевдобрукит, апатит, циркон, монацит; титанит в гранитах в отличие от диорито-, гранито-гнейсов и пегматитов – отсутствует (Вишнякова и др., 2018). Заметим, что отсутствие титанита ранее было использовано при геологической съемке в качестве минералогического маркера принадлежности гранитов ко второй фазе массива (Олерский и др., 1984).

Все перечисленные породы гранитоидного состава, включая ортогнейсы, принадлежат известково-щелочным сериям умеренной и нормальной щелочности и относятся к умеренно- или высококалиевым (рис. 2). Их химический состав приведен в работе (Вишнякова и др., 2018). Позиция фигуративных точек пород на классификационных диаграммах позволяет выделить две главные серии. Первая – это диорито- и гранодиоритогнейсы (обр. 34 и др.), подобные гранитоидам Каменского массива, расположенного к югу от Адуйского. Их петротипом является тоналит-гранодиоритовая серия Верхисетского массива (C_1-C_3). Они испытали метаморфизм и анатексис, послужив в том числе источником вещества для адуйских гранитов (Ферштатер, 2013). Вторая серия – жильные граниты (обр. 39 и др.), сопоставимые с гранитами центральной и восточной частей Адуйского массива. Они принадлежат Мурзинско-Адуйской адамеллит-гранит-лейкогранитной серии (P_1-T_1) и могут быть использованы для оценки возраста этих пород. Принадлежность гранито-гнейсов и пегматоидных гранитов к определенным формационным типам гранитоидов не столь однозначна. Например, гранито-гнейсы (обр. 38) имеют черты сходства с гранитоидами Степнинской и Шиловско-Коновской группы массивов монцитит-гранит-лейкогранитовой серии (P_1-T_1).

ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ И U-Pb ВОЗРАСТ ЦИРКОНА

Большинство кристаллов циркона в граните (обр. 39) бесцветные прозрачные, реже встречаются окрашенные в желто-коричневатые цвета полупрозрачные разности. Они имеют бипирамидально-призматический облик (отношение длины к шири-

не 2:1 – 4:1) и характерное внутреннее строение, обусловленное наличием низкоурановых светлых на катодолюминесцентных изображениях ядер и высокоурановых темных кайм, обладающих тонкой ритмичной зональностью. Наблюдаются редкие минеральные включения неправильной формы. Важнейшей особенностью некоторых ядер является их обломочный облик без признаков абразии (см. кристаллы 3, 6 обр. 39 на рис. 3а). На одном зерне отмечены следы растворения/плавления минерального включения в форме луковицы, впоследствии регенерированного цирконом каймы. С учетом отсутствия выраженных явлений катаклаза пород данное обстоятельство служит доказательством ксеногенного характера ядер и, соответственно, магматического генезиса кайм.

Темные в КЛ каймы присутствуют в абсолютном большинстве зерен. Им, как и ядрам, свойственна тонкая ритмичная зональность. Характер контакта между ядром и каймой даже в случае, когда ядро имеет обломочный облик, указывает на дорастание ядер. Различия физических свойств между ядром и каймой подчеркивают трещины, преимущественно локализующиеся в ядрах кристаллов.

Для ядер характерно низкое отношение Th/U в диапазоне 0.09–0.24 (рис. 3д). В каймах оно еще ниже – 0.04–0.01. Отметим, что столь низкое отношение Th/U служит признаком гидротермального происхождения циркона (Rubatto, 2002; Hoskin, Schaltegger, 2003; Kaulina et al., 2020). Тем не менее данный критерий не всегда может быть использован для генетической интерпретации.

Результаты датирования приведены в табл. 1 и на рис. 3. Конкордантный возраст ядер составляет 270.4 ± 1.1 млн лет; датировки богатых ураном кайм – 261–248 млн лет (рис. 3е).

Ранее в работе (Вишнякова и др., 2017) были рассмотрены кристаллы циркона из диоритогнейса (обр. 34), гранито-гнейса (обр. 38) и пегматоидного гранита (обр. 62). Их внешний облик в названных породах близок. Преобладают удлиненные призматические зерна, отношение длины к ширине в которых составляет 2:1 – 5:1. Зональность хорошо выражена (рис. 3б–г), имеет осцилляторный характер с зонами, параллельными призме и дипирамидам, и только в обр. 34 резко доминируют зоны, параллельные призме. Отношение Th/U в цирконе обр. 34 колеблется в пределах 0.72–0.24; обр. 38 – 0.73–0.16; обр. 62 – 0.86–0.02. Однако если удалить из выборки зерна с высокой величиной дискордантности >5 , оставшиеся зерна будут иметь очень узкий диапазон отношения Th/U в районе 0.6 (рис. 3д), более точно характеризую состав первичного циркона и его среды кристаллизации.

Большинство зерен циркона обр. 62 окружены тонкими очень темными в КЛ каймами, присутствуют и полностью темные зерна с ритмичной

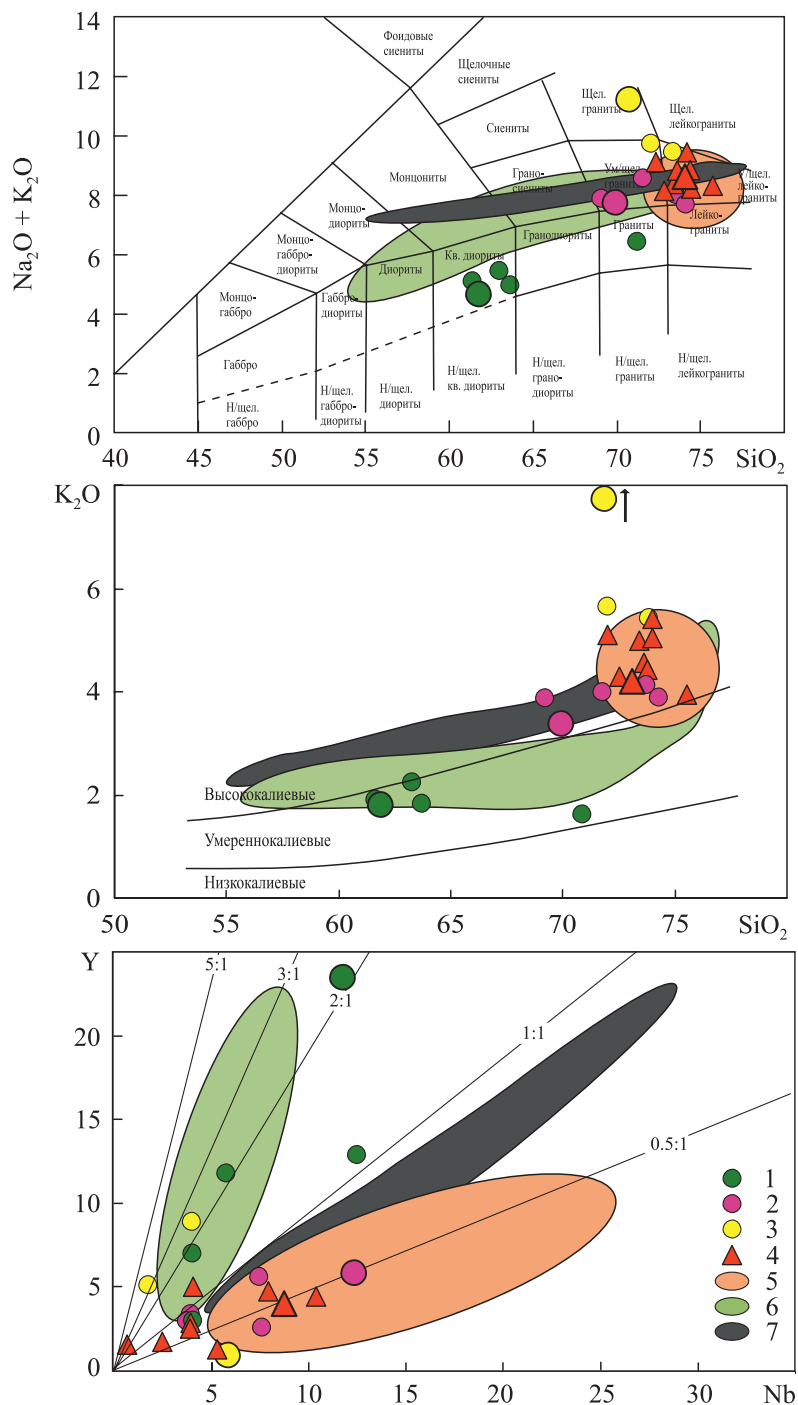


Рис. 2. Диаграммы $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ – SiO_2 , K_2O – SiO_2 и Y–Nb для гранитоидов западной части Адуйского массива.

1 – диоритогнейсы; 2 – гранитогнейсы; 3 – пегматоидные граниты; 4 – лейкограниты; 5 – гранитоиды адамеллит-гранит-лейкогранитной формации, составляющие Адуйский и Мурзинский массивы (Ферштатер, 2013); 6 – граниты тоналит-гранодиорит-гранитной формации Каменского и Верхисетского массивов (Ферштатер, 2013); 7 – гранит-лейкогранитовая формация Шиловско-Коневской группы и Степнинского массива (Каллистов, Осипова, 2019). Крупными значками показаны составы пород, из которых были выделены и проанализированы цирконы.

Fig. 2. $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ – SiO_2 , K_2O – SiO_2 and Y–Nb diagrams for granitoids of the western part of the Aduisky massif.

Symbols: 1 – diorite-gneisses; 2 – granite-gneisses; 3 – pegmatoid granites; 4 – leucogranites; 5 – granitoids of adamellite-granite-leucogranite formation, composing the Aduisky and Murzinsky massifs (Fershtater, 2013); 6 – granites of tonalite-granodiorite-granite formation Kamensky and Verkhisetsky massifs (Fershtater, 2013); 7 – granite-leucogranite formation of the Shilovsky-Konevsky group and Stepninsky massif (Kallistov, Osipova, 2019). Large icons show the compositions of rocks from which zircons were isolated and analyzed.

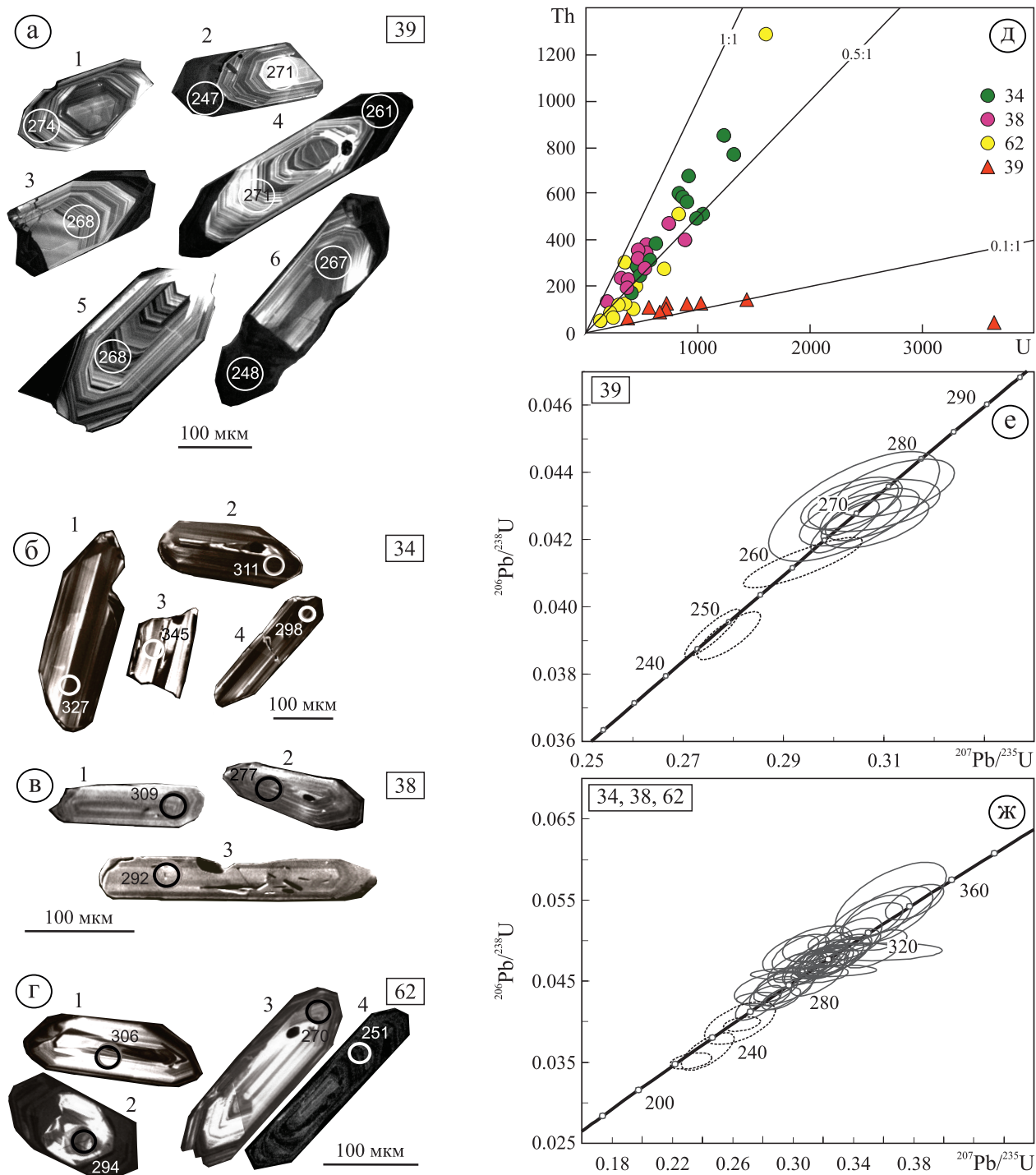


Рис. 3. Катодолюминесцентные изображения зерен циркона (обр. 39, 34, 38, 62) и диаграммы Th–U, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ – $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$.

Кружками на микрофотографиях показаны кратеры, в которых производились измерения; цифры соответствуют измеренному возрасту. Овалы на конкордиях представляют циркон ядер (сплошные линии) и кайм (пунктирные линии) (Вишнякова и др., 2017). На диаграмму Th–U нанесены составы, имеющие величину дискордантности менее 5.

Fig. 3. Cathodoluminescence images of zircon grains (samples 39, 34, 38, 62) and Th–U diagrams, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ – $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$.

The circles in the microphotographs show the craters in which the measurements were made; the numbers correspond to the measured age. Ovals on concordias represent zircon cores (solid lines) and rims (dotted lines) (Vishnyakova et al., 2017). Compositions with a discordance value of less than 5 are plotted on the Th–U diagram.

Таблица 1. U-Pb возраст ядер 1–9 и кайм 10–12 зерен циркона в граните (обр. 39)**Table 1.** U-Pb age of cores 1–9 and rims 10–12 of zircon grains in granite (sample 39)

Содержание, г/г			Изотопные отношения $\pm$ % (1 σ)			Возраст $\pm$ 1 σ , млн лет		D, %
U	Th	$^{206}\text{Pb}^*$	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	
573.62	94.61	21.50	0.1704	0.0436 ± 1.3	0.0520 ± 2.10	274.8 ± 3.5	285 ± 49	3.6
380.26	51.60	14.10	0.1402	0.0430 ± 2.5	0.0513 ± 2.80	271.5 ± 6.6	254 ± 64	–6.3
684.63	79.23	25.40	0.1196	0.0431 ± 1.2	0.0511 ± 1.80	271.9 ± 3.3	245 ± 42	–9.8
1445.83	136.15	53.30	0.0973	0.0429 ± 1.2	0.0515 ± 1.10	270.9 ± 3.2	265 ± 26	–2.1
720.96	115.98	26.40	0.1662	0.0426 ± 1.2	0.0517 ± 1.80	268.8 ± 3.3	270 ± 40	0.6
2112.76	516.35	77.00	0.2525	0.0424 ± 1.2	0.0517 ± 0.97	267.7 ± 3.2	272 ± 22	1.6
702.46	86.77	25.80	0.1276	0.0428 ± 1.2	0.0522 ± 1.60	269.9 ± 3.3	293 ± 36	8.5
1036.33	112.60	38.70	0.1123	0.0430 ± 1.2	0.0519 ± 2.50	271.6 ± 3.2	281 ± 58	3.5
900.61	113.69	33.00	0.1304	0.0425 ± 1.2	0.0526 ± 1.90	268.4 ± 3.2	310 ± 43	15.5
3634.24	23.42	122.00	0.0067	0.0392 ± 1.2	0.0517 ± 0.89	247.6 ± 2.9	272 ± 20	10.0
5230.91	183.87	186.00	0.0363	0.0413 ± 1.2	0.0516 ± 0.74	261.0 ± 3.0	266 ± 17	2.0
5567.77	34.60	188.00	0.0064	0.0392 ± 1.2	0.0510 ± 0.58	248.0 ± 2.9	241 ± 13	–2.8

Примечание. Погрешности составляют $\pm 1\sigma$. Данные возраста приведены с коррекцией на ^{204}Pb . Pb* – радиогенный свинец. D – дискордантность. Ошибка калибровки стандарта 0.34%. Дискордантность рассчитана по формуле $D = (\text{возраст } (^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}) / \text{возраст } (^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}) - 1) \times 100\%$.

Note. The errors are $\pm 1\sigma$. Age data are corrected for ^{204}Pb . Pb* – radiogenic lead. D – discordance. Standard calibration error 0.34%. Discordance is calculated using the formula $D = (\text{Age } (^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}) / \text{Age } (^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}) - 1) \times 100\%$.

зональностью, ранее ускользнувшие от внимания в указанной работе. Они содержат 1500–17000 г/г U и имеют отношение Th/U менее 0.05. По этим признакам такой циркон подобен каймам из обр. 39. Подобие заключается и в том, что ядра могут иметь обломочный облик, например зерно 2 на рис. 3г.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Последовательность событий, приведших к образованию Адуйского массива, ранее была продемонстрирована на примере его западной части, представленной перемежаемостью гранитов и ортогнейсов (Вишнякова и др., 2018). Так, в аподиоритовом ортогнейсе (обр. 34) были выявлены возрастные группы циркона – 335.0 ± 12.7 , 306.4 ± 7 и 283.2 ± 7.3 млн лет, в гнейсовидном граните (обр. 38) – 342 ± 9 , 307.8 ± 5.2 и 286.1 ± 8.1 , в пегматоидном граните (обр. 62) – 329.6 ± 9.3 , 303.9 ± 5.8 , 292.4 ± 2.6 и 270.3 ± 5.6 млн лет. Предположено, что данные группы отражают стадии магматической кристаллизации, мигматизации, частичного плавления и кристаллизации анатектического расплава. Однако наблюдаемое на катоодолюминесцентных изображениях строение зерен циркона из гнейсов, как и ядер цирконовых зерен из пегматоидных гранитов, не позволяет однозначно выделить данные группы (или популяции), соотносимые с обозначенными возрастными кластерами. Широкий разброс возрастов, по-видимому, можно объяснить не отдельными популяциями, а потерей свинца (“сползанием по конкордии” от 345 до 270 млн лет, рис. 3ж) цирконами протолита в процес-

се его метаморфизма до момента массового плавления и гранитообразования в МАБ.

Датировки ядер зерен циркона из гранитов (обр. 39) образуют единый возрастной кластер 270.4 ± 1.1 млн лет, совпадающий со временем преобразования циркона в ортогнейсах. Соответственно, можно предположить этот возрастной рубеж в качестве завершающего этапа высокоградного (в параметрах верхов амфиболитовой фации) метаморфизма и начала массового гранитообразования в метаморфическом блоке.

В пегматоидном граните ядра зерен циркона имеют те же строение, состав (отношение Th/U) и возраст, что и циркон вмещающих гнейсов, но встречаются каймы и отдельные зерна высокоуранового циркона (обр. 62, зерна 4 на рис. 3г), которые могут быть соотнесены с процессом образования этого гранита. Они имеют датировки моложе 270 млн лет, не учтенные ранее в качестве самостоятельной группы по причине высокой дискордантности значений возраста (Вишнякова и др., 2018). Подобные высокоурановые цирконы с датировками 260–250 млн лет характеризуют граниты центральной и восточной частей Адуйского массива, жильные граниты из гнейсов в основании Мурзинского массива и сам Мурзинский массив (Краснобаев и др., 2006; Шардакова и др., 2021), давая подсказку о времени главного этапа гранитообразования в МАБ.

Новые возрастные данные, полученные для кайм зерен циркона в граните (обр. 39), показывают их близость каймам циркона пегматоидных гранитов (обр. 62) и гранитов центральной и восточной частей массива (Краснобаев и др., 2006). Та-

кой циркон находится в равновесии с монацитом, имеет высокое содержание U и очень низкое отношение Th/U. Следовательно, его возраст можно уверенно отождествлять со временем кристаллизации массива в интервале 265–250 млн лет. Этот возрастной интервал подтверждается датировками гранитов другими изотопными методами: U-Pb и химическим U-Th-Pb датированием монацита, Rb-Sr, K-Ar, Ar-Ar (Попов и др., 2003; Ферштатер и др., 2003; Mao et al., 2003; Вотяков и др., 2010; Хиллер и др., 2015; Замятин и др., 2017; Смирнов и др., 2022). Ему не противоречат и Re-Os оценки времени формирования молибденового оруденения (273 ± 5 и 282 ± 6 млн лет), связанного с Малышевским массивом (Mao et al., 2003), на который адуйские граниты оказали термальное воздействие.

Низкое отношение Th/U в ядрах циркона обр. 39 относительно аналогичных ядер в пегматоидных гранитах обр. 62 может указывать на иной состав протолита этих гранитов. Аргументом в пользу различных источников гранитов может служить высокое первичное изотопное отношение стронция ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{270} = 0.713$ в обр. 39, отличное от такового в пегматоидных гранитах – 0.708 (Вишнякова и др., 2018). На различие в составе коровых протолитов Адуйского массива обратил внимание В.С. Попов с соавторами (2003), показав гетерогенность его изотопных резервуаров. В качестве таковых были предложены разновозрастные докембрийские сиалические породы МАБ. Вклад палеозойских гранитоидов как источника вещества для Адуйского и Мурзинского массивов также рассматривается в работах (Ферштатер, 2013; Ферштатер и др., 2019). Такие породы в западном контакте Адуйского массива представлены диорито- и гранитогнейсами с низким первичным отношением изотопов стронция – 0.704–0.706, и именно они могли являться источником, в частности, пегматоидных гранитов.

ВЫВОДЫ

Жильные граниты в метаморфическом обрамлении Адуйского массива по петро- и геохимическим характеристикам сопоставимы с гранитами главных фаз. Они, как и граниты, слагающие массив, содержат кристаллы циркона гетерогенного происхождения. Такие цирконы имеют светлые в КЛ ядра, часто обломочного облика без признаков абразии. Отношение Th/U в ядрах варьирует (0.6–0.1) в зависимости от состава протолита гранитов Адуйского массива, в роли которого могли выступать допалеозойские вулканогенно-осадочные комплексы и палеозойские гранитоиды. Темные в КЛ каймы, как и ядра, обладают тонкой ритмичной зональностью. Отношение Th/U в каймах менее 0.05.

Датировки циркона ортогнейсов и ядер из гранитов варьируют в диапазоне от 290 до 270 млн лет, отражая длительный процесс метаморфизма

пород различного возраста, состава и генезиса. Датировки кайм определяют кристаллизацию высоководных гранитов Адуйского массива в интервале 265–250 млн лет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Вишнякова М.Д., Бородина Н.С., Ферштатер Г.Б., Беа Ф., Монтеро П. (2017) U-Pb возраст циркона из пород Крутихинского массива – возможного протолита части гранитов Адуйского массива (Средний Урал). *Тр. ИГГ УрО РАН*, вып. 164, 260–263.
- Вишнякова М.Д., Бородина Н.С., Ферштатер Г.Б., Солошенко Н.Г., Стрелецкая М.В. (2018) Процессы мигматизации и гранитообразования в западном экзоконтакте Адуйского массива (Средний Урал). *Вестн. Перм. ун-та*, 17(3), 208–227. <https://doi.org/10.17072/psu.geol.17.3.208>
- Вотяков С.Л., Хиллер В.В., Шапова Ю.В., Поротников А.В. (2010) Химическое электронно-зондовое датирование минералов-концентраторов радиоактивных элементов: методические аспекты. *Литосфера*, (4), 94–115.
- Замятин Д.А., Вотяков С.Л., Ферштатер Г.Б., Вишнякова М.Д. (2017) Химическое U-Th-Pb-датирование и структурное разупорядочение монацита-(Ce) из гранитоидов Адуйского массива, Средний Урал. *Докл. АН*, 476(1), 83–87. <https://doi.org/10.7868/S0869565217250181>
- Золосев К.К., Контарь Е.С., Левин В.Я., Лисицын А.И., Мормиль С.И., Попов Б.А., Рапопорт М.С., Шуб В.С. (1990) Глубинное строение и металлогения подвижных поясов. М.: Недра, 191 с.
- Казаков И.И., Стороженко Е.В., Харитонов И.Н., Стефановский В.В., Кошевой Ю.Н. (2014) Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. Изд. 2-е. Карта доплиоценовых образований. Среднеуральская серия. Л. О-41-XXVI (Асбест).
- Каллистов Г.А., Осипова Т.А. (2019) К характеристике геохимических особенностей гранитоидов Шиловско-Коневской группы массивов (Средний Урал), продуктивных на вольфрамовое оруденение грейзенового типа. *Вестн. ИГ Коми НЦ УрО РАН*, 12(300), 4–11.
- Краснобаев А.А., Ферштатер Г.Б., Беа Ф., Монтеро П. (2006) Полигенные цирконы Адуйского батолита (Средний Урал). *Докл. АН*, 410(2), 244–249.
- Олерский В.П., Машаров А.А., Грабежева Т.Г. (1984) Групповое геологическое доизучение масштаба 1 : 50 000 Адуйской площади. Л. О-41-87-В (ю. п.), О-41-99-А, Б, В, О-41-111-А, В в Режевском, Березовском и Белоярском районах Свердловской области. Отчет Западно Адуйской ГСП за 1979–1984 гг. Свердловск, ТГФ.
- Попов В.С., Богатов В.И., Петрова А.Ю., Беляцкий Б.В. (2003) Возраст и возможные источники гранитов Мурзинско-Адуйского блока, Средний Урал: Rb-Sr и Sm-Nd изотопные данные. *Литосфера*, (4), 3–18.
- Рапопорт М.С., Медяков И.А. (1974) Геологическая карта Урала масштаба 1 : 50 000. Л. О-41-99-Г, О-41-111-Б, О-41-111-Г. Отчет Белоярского геологосъемочного отряда о геологическом доизучении за 1970–1974 гг. ТФГИ по УрФО № 34418.

- Смирнов В.Н., Иванов К.С., Травин А.В., Захаров А.В., Ерохин Ю.В. (2022) ^{40}Ar - ^{39}Ar датирование пегматитов Мурзинско-Адуйского района (Средний Урал): результаты и их геологическая интерпретация. *Литосфера*, **22**(5), 612-623. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-5-612-623>
- Ферштатер Г.Б. (2013) Палеозойский интрузивный магматизм Среднего и Южного Урала. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 365 с.
- Ферштатер Г.Б., Гердес А., Смирнов В.Н. (2003) Возраст и история формирования Адуйского гранитного массива. *Тр. ИГТ УрО РАН*, вып. 150, 146-150.
- Ферштатер Г.Б., Краснобаев А.А., Монтеро П., Беа Ф., Бородина Н.С., Вишнякова М.Д., Солошенко Н.Г., Стрелецкая М.В. (2019) Возраст и изотопно-геохимические особенности мурзинско-адуйского метаморфического комплекса в связи с проблемой формирования Мурзинского межформационного гранитного плутона. *Геология и геофизика*, **60**(3), 342-365. <https://doi.org/10.15372/GiG2019039>
- Хиллер В.В., Попов М.П., Ерохин Ю.В., Захаров А.В. (2015) Th-U-Pb возраст редкометалльных гранитных пегматитов в восточном экзоконтакте Адуйского массива (Средний Урал). *Вестн. ВГУ. Сер.: Геология*, (4), 61-65.
- Шардакова Г.Ю., Прибавкин С.В., Краснобаев А.А., Бородина Н.С., Червяковская М.В. (2021) Цирконы из пород Мурзинско-Адуйского метаморфического комплекса (Средний Урал): геохимия, термометрия, полихронность, генетические следствия. *Геодинамика и тектонофизика*, **12**(2), 332-349. <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-2-0527>
- Hoskin P.W.O., Schaltegger U. (2003) The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Zircon*. (Ed. by J.M. Hanchar, P.W.O. Hoskin). Berlin; Boston: De Gruyter, 27-62. <https://doi.org/10.1515/9781501509322-005>
- Kaulina T., Lyalina L., Kamenetsky V., Il'chenko V., Bocharov V., Gannibal M. (2020) Composition and Structure of Zircon from Hydrothermal Uranium Occurrences of the Litsa Ore Area (Kola Region, Russia). *Geosciences*, **10**(8), 278. <https://doi.org/10.3390/geosciences10080278>
- Mao J., Du A., Seltmann R., Yu J. (2003) Re-Os ages for the Shameika porphyry Mo deposit and the Lipovy Log rare metal pegmatite, central Urals, Russia. *Mineral. Depos.*, **38**, 251-257. <https://doi.org/10.1007/s00126-002-0331-2>
- Rubatto D. (2002) Zircon Trace Element Geochemistry: Partitioning with Garnet and the Link between U-Pb Ages and Metamorphism. *Chem. Geol.*, **184**(1-2), 123-138. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(01\)00355-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(01)00355-2)
- Williams I.S. (1998) U-Th-Pb Geochronology by ion microprobe. Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes. *Rev. Econom. Geol.*, **7**, 1-35. <https://doi.org/10.5382/Rev.07.01>
- Fershtater G.B. (2013) Paleozoic intrusive magmatism of the Middle and Southern Urals. Ekaterinburg, RIO UrO RAN, 365 p. (In Russ.)
- Fershtater G.B., Gerdes A., Smirnov V.N. (2003) Age and formation history of the Adui granite massif. *Tr. IGT UrO RAN*, вып. 150, 146-150. (In Russ.)
- Fershtater G.B., Krasnobaev A.A., Montero P., Bea F., Borodina N.S., Vishnyakova M.D., Soloshenko N.G., Streletskaia M.V. (2019) Age and Isotope-Geochemical Features of the Murzinka-Adui Metamorphic Complex in Connection with the Problem of Formation of the Murzinka Interformational Granite Pluton. *Russ. Geol. Geophys.*, **60**(3), 287-308 (translated from *Geol. Geofiz.*, **60**(3), 342-365). <https://doi.org/10.15372/RGG2019039>
- Hiller V.V., Popov M.P., Erokhin Yu.V., Zakharov A.V. (2015) Th-U-Pb age of rare-metal granitic pegmatites in the eastern exocontact of the Adui massif (Middle Urals). *Vestn. VSU. Ser.: Geology*, (4), 61-65. (In Russ.)
- Hoskin P.W.O., Schaltegger U. (2003) The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Zircon*. (Ed. by J.M. Hanchar, P.W.O. Hoskin). Berlin; Boston: De Gruyter, 27-62. <https://doi.org/10.1515/9781501509322-005>
- Kallistov G.A., Osipova T.A. (2019) On the characterization of the geochemical features of granitoids of the Shilovo-Konevsky group of massifs (Middle Urals), productive for greisen-type tungsten mineralization. *Vestn. IG Komi NTs URO RAN*, **12**(300), 4-11. (In Russ.)
- Kaulina T., Lyalina L., Kamenetsky V., Il'chenko V., Bocharov V., Gannibal M. (2020) Composition and Structure of Zircon from Hydrothermal Uranium Occurrences of the Litsa Ore Area (Kola Region, Russia). *Geosciences*, **10**(8), 278. <https://doi.org/10.3390/geosciences10080278>
- Kazakov I.I., Storozhenko E.V., Haritonov I.N., Stefanovskij V.V., Koshevoj Yu.N. (2014) State geological map of the Russian Federation, scale 1 : 200 000. 2nd ed. Map of pre-Pliocene formations. Sredneural'skaya series. Sheet O-41-XXVI (Asbest). (In Russ.)
- Krasnobaev A.A., Fershtater G.B., Bea F., Montero P. (2006) Polygenic zircons of the Adui batholith (Middle Urals). *Dokl. AN*, **410**(2), 244-249. (In Russ.)
- Mao J., Du A., Seltmann R., Yu J. (2003) Re-Os ages for the Shameika porphyry Mo deposit and the Lipovy Log rare metal pegmatite, central Urals, Russia. *Mineral. Depos.*, **38**, 251-257. <https://doi.org/10.1007/s00126-002-0331-2>
- Olerskii V.P., Masharov A.A., Grabezheva T.G. (1984) Group geological additional study on a scale of 1 : 50 000 of the Aduiskaya area. Sheets O-41-87-B (s.p.), O-41-99-A, B, C, O-41-111-A, B in the Rezhevsky, Berezovsky and Belayarsky districts of the Sverdlovsk region. Report of the West Aduy GSP for 1979-1984. Sverdlovsk, TGF. (In Russ.)
- Popov V.S., Bogatov V.I., Petrova A.Yu., Belyatsky B.V. (2003) Age and possible sources of granites of the Murzinsko-Adui block, Middle Urals: Rb-Sr and Sm-Nd isotope data. *Lithosphere (Russia)*, (4), 3-18. (In Russ.)
- Rapoport M.S., Medyakov I.A. (1974) Geological map of the Urals, scale 1 : 50 000. Sheets O-41-99-G, O-41-111-B, O-41-111-G. Report of the Belayarsk geological survey team on additional geological research for 1970-1974. TFGI in the Urals Federal District no. 34418. (In Russ., unpublished).
- Rubatto D. (2002) Zircon Trace Element Geochemistry: Partitioning with Garnet and the Link between U-Pb Ages and Metamorphism. *Chem. Geol.*, **184**(1-2), 123-138. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(01\)00355-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(01)00355-2)
- Shardakova G.Yu., Pribavkin S.V., Krasnobaev A.A., Borodina N.S., Chervyakovskaya M.V. (2021) Zircons from rocks of the Murzinka-Adui metamorphic complex: Geo-

REFERENCES

- chemistry, thermometry, polychronism, and genetic consequences. *Geodynamics & Tectonophysics*, **12**(2), 332-349. (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-2-0527>
- Smirnov V.N., Ivanov K.S., Travin A.V., Zakharov A.V., Erokhin Yu.V. (2022) ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of pegmatites in the Murzinsko-Adui region (Middle Urals): Results and their geological interpretation. *Lithosphere (Russia)*, **22**(5), 612-623. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-5-612-623>
- Vishnyakova M.D., Borodina N.S., Fershtater G.B., Bea F., Montero P. (2017) U-Pb age of zircon from rocks of the Krutikhinsky massif – a possible protolith of part of the granites of the Adui massif (Middle Urals). Tr. IGG UrO RAN, vyp. 164, 260-263. (In Russ.)
- Vishnyakova M.D., Borodina N.S., Fershtater G.B., Soloshenko N.G., Streletskaya M.V. (2018) Processes of migmatization and granite formation in the western exocontact of the Adui massif (Middle Urals). *Vestn. Perm. Un-ta*, **17**(3), 208-227. (In Russ.) <https://doi.org/10.17072/psu.geol.17.3.208>
- Votyakov S.L., Hiller V.V., Shchapova Yu.V., Porotnikov A.V. (2010) Chemical electron-probe dating of minerals-concentrators of radioactive elements: methodological aspects. *Lithosphere (Russia)*, (4), 94-115. (In Russ.)
- Williams I.S. (1998) U-Th-Pb Geochronology by ion microprobe. Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes. *Rev. Econom. Geol.*, **7**, 1-35. <https://doi.org/10.5382/Rev.07.01>
- Zamyatin D.A., Votyakov S.L., Fershtater G.B., Vishnyakova M.D. (2017) Chemical U-Th-Pb dating and structural disordering of monazite-(Ce) from granitoids of the Adui massif, Middle Urals. *Dokl. AN*, **476**(1), 83-87. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0869565217250181>
- Zoloev K.K., Kontar' E.S., Levin V.Ya., Lisitsyn A.I., Mormil' S.I., Popov B.A., Rapoport M.S., Shub V.S. (1990) Deep structure and metallogeny of mobile belts. Moscow, Nedra Publ., 191 p.