GEODYNAMICS & TECTONOPHYSICS
Published by the Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences

PALEOGEODYNAMICS

2023 VOLUME 14 ISSUE 6 ARTICLE 0727

ISSN 2078-502X

DOI: 10.5800/GT-2023-14-6-0727

FINAL CONSOLIDATION AGE OF THE SOUTHERN PART OF THE SIBERIAN CRATON

T.V. Donskaya [1]✉, D.P. Gladkochub [1], S.A. Sergeev [2], V.B. Khubanov [3], A.M. Mazukabzov [1], Z.L. Motova [1]

[1] Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 128 Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia

[2] Karpinsky Russian Geological Research Institute, 74 Sredny Ave, Saint Petersburg, 199106, Russia

[3] Dobretsov Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 6a Sakhyanova St, Ulan-Ude 670047, Republic of Buryatia, Russia

ABSTRACT. Petrographic, geochemical and U-Pb geochronological research studies are done into cataclastic granitoids of the southeastern part of the Irkutsk block of the Sharyzhalgay basement uplift of the Siberian craton – the uplift which is considered southern part of the Tungus superterrane according to most of tectonic schemes. The representative sample of these granitoids corresponds to granodiorite in its geochemical properties and is characterized by high contents of Al_2O_3, Th, Sr, Ba, low concentrations of K_2O, Nb, Y, Yb, a highly fractionated rare earth elements pattern (La_n/Yb_n=284), and the absence of europium anomaly. U-Pb geochronological studies of zircon from cataclastic granodiorite were carried out independently by two methods: SIMS and LA-ICP-MS, which showed good consistency of the results. The U-Pb age of the cores of zircon grains with magmatic zoning corresponds to 2893±19 Ma (SIMS method) and 2889±16 Ma (LA-ICP-MS method). These results can be interpreted as the age of the Archean granodiorite protolith. The rims of zircon crystals with the Archean cores, as well as the individual zircon crystals with parallel zoning, yielded ages of 1855±6 Ma (SIMS method) and 1864±5 Ma (LA-ICP-MS method), which record the time of granodiorite transformations. The age of about 1.86 Ga corresponds to the main Early Proterozoic stage of metamorphism, migmatization and magmatism, which show their widespread occurrence in the Sharyzhalgay basement uplift. This age estimate together with the previously published ages for metamorphic and their synchronous magmatic events in the Sharyzhalgay uplift allowed concluding that the Tungus superterrane joined the earlier formed core of the Siberian craton in the time interval 1.85–1.88 Ga. The final stage in the Siberian craton formation is the development of the South Siberian post-collisional magmatic belt, intersecting all large Early Precambrian blocks of the southern part of the Siberian craton, already united into a single structure.

KEYWORDS: granodiorite; zircon; U-Pb age; Early Proterozoic; Siberian craton

FUNDING: The study was supported by the Russian Science Foundation (grant 23-17-00196) and the Russian Government (grant 075-15-2022-1100). The work was conducted using equipment and infrastructure of the Centre for Geodynamics and Geochronology at the Institute of the Earth's Crust SB RAS (grant 075-15-2021-682). U-Pb isotope-geochronological studies involving the LA-ICP-MS method were carried out using Shared Research Facilities "Geospectr" of the GIN SB RAS, Ulan-Ude (basic projects, State Registration AAAA-A21-121011390002-2 and AAAA-A21-121011890029-4).

RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Tatiana V. Donskaya, tanlen@crust.irk.ru

Received: September 13, 2023
Revised: October 10, 2023
Accepted: October 13, 2023

FOR CITATION: Donskaya T.V., Gladkochub D.P., Sergeev S.A., Khubanov V.B., Mazukabzov A.M., Motova Z.L., 2023. Final Consolidation Age of the Southern Part of the Siberian Craton. Geodynamics & Tectonophysics 14 (6), 0727. doi:10.5800/GT-2023-14-6-0727

© Donskaya T. V., Gladkochub D. P., Sergeev S. A., Khubanov V. B., Mazukabzov A. M., Motova Z. L., 2023

ВОЗРАСТ ФИНАЛЬНОЙ КОНСОЛИДАЦИИ СТРУКТУРЫ СИБИРСКОГО КРАТОНА

Т.В. Донская[1], Д.П. Гладкочуб[1], С.А. Сергеев[2], В.Б. Хубанов[3], А.М. Мазукабзов[1], З.Л. Мотова[1]

[1] Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

[2] Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, 199106, Санкт-Петербург, пр-т Средний, 74, Россия

[3] Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Республика Бурятия, Россия

АННОТАЦИЯ. Проведены петрографические, геохимические и U-Pb геохронологические исследования катаклазированных гранитоидов юго-восточной части Иркутного блока Шарыжалгайского выступа фундамента Сибирской платформы, который, согласно большинству тектонических схем, является южной частью Тунгусского супертеррейна. По своим геохимическим характеристикам исследованный представительный образец этих гранитоидов соответствует гранодиориту и обнаруживает повышенные содержания Al_2O_3, Th, Sr, Ba, низкие концентрации K_2O, Nb, Y, Yb, сильно фракционированный спектр распределения редкоземельных элементов (La_n/Yb_n=284) и отсутствие европиевой аномалии. U-Pb геохронологические исследования циркона из катаклазированного гранодиорита выполнены независимо двумя методами: SIMS и LA-ICP-MS, показавшими хорошую сходимость полученных результатов. U-Pb возраст центральных частей кристаллов циркона, имеющих магматическую зональность, соответствует значениям 2893±19 млн лет (метод SIMS) и 2889±16 млн лет (метод LA-ICP-MS). Эти результаты датирования могут быть проинтерпретированы как возраст архейского протолита гранодиорита. Для краевых оболочек кристаллов циркона, имеющих архейские ядра, и отдельных кристаллов циркона с параллельной зональностью были установлены значения возраста 1855±6 млн лет (метод SIMS) и 1864±5 млн лет (метод LA-ICP-MS), которые фиксируют время преобразований гранодиорита. Оценка возраста около 1.86 млрд лет соответствует основному раннепротерозойскому этапу метаморфизма, мигматизации и сопряженного магматизма, которые широко проявлены в Шарыжалгайском выступе фундамента. Эта оценка возраста совместно с опубликованными ранее значениями возраста метаморфических и синхронных с ними магматических событий в Шарыжалгайском выступе позволила сделать вывод о присоединении Тунгусского супертеррейна к ранее сформированному ядру Сибирского кратона на временном рубеже 1.85–1.88 млрд лет. Финальным этапом становления Сибирского кратона является формирование пород Южно-Сибирского постколлизионного магматического пояса, пересекающего все уже объединенные в единую структуру крупные раннедокембрийские блоки южной части Сибирского кратона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гранодиорит; циркон; U-Pb возраст; ранний протерозой; Сибирский кратон

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-17-00196) и Правительства Российской Федерации (грант № 075-15-2022-1100). В работе задействовалось оборудование ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН в рамках гранта № 075-15-2021-682. U-Pb изотопно-геохронологические исследования методом LA-ICP-MS выполнены в ЦКП «Геоспектр» ГИН СО РАН, г. Улан-Удэ (в рамках базовых проектов, № гос. рег. АААА-А21-121011390002-2 и АААА-А21-121011890029-4).

1. ВВЕДЕНИЕ

Сибирский кратон (фундамент Сибирской платформы) был сформирован в раннем протерозое на временном интервале 1.85–2.00 млрд лет в результате объединения архейских и раннепротерозойских террейнов в общую структуру консолидированной литосферы [Rosen et al., 1994; Rosen, 2003; Gladkochub et al., 2006; Smelov, Timofeev, 2007; Glebovitsky et al., 2008; Pisarevsky et al., 2008; Donskaya, 2020; Priyatkina et al., 2020]. Становление структуры кратона сопровождалось образованием коллизионных (орогенных) поясов и шовных зон между крупными архейскими и раннепротерозойскими кратонными блоками (террейнами) [Rosen, 2003; Glebovitsky et al., 2008; Donskaya, 2020; Priyatkina et al., 2020]. В настоящее время не существует однозначной и общепринятой точки зрения на сценарий образования структуры Сибирского кратона, в том числе и на возраст основных этапов, приведших к его финальной консолидации [Rosen, 2003; Smelov, Timofeev, 2007; Glebovitsky et al., 2008; Donskaya, 2020; Priyatkina et al., 2020]. Одними из наиболее информативных зон, возраст пород которых позволяет оценить время объединения кратонных блоков в более крупные структуры, являются области их сочленения. Важный связующий узел, изучение которого позволит расшифровать сценарий финального формирования Сибирского кратона, располагается в его южной части (рис. 1). Согласно тектоническим схемам О.М. Розена

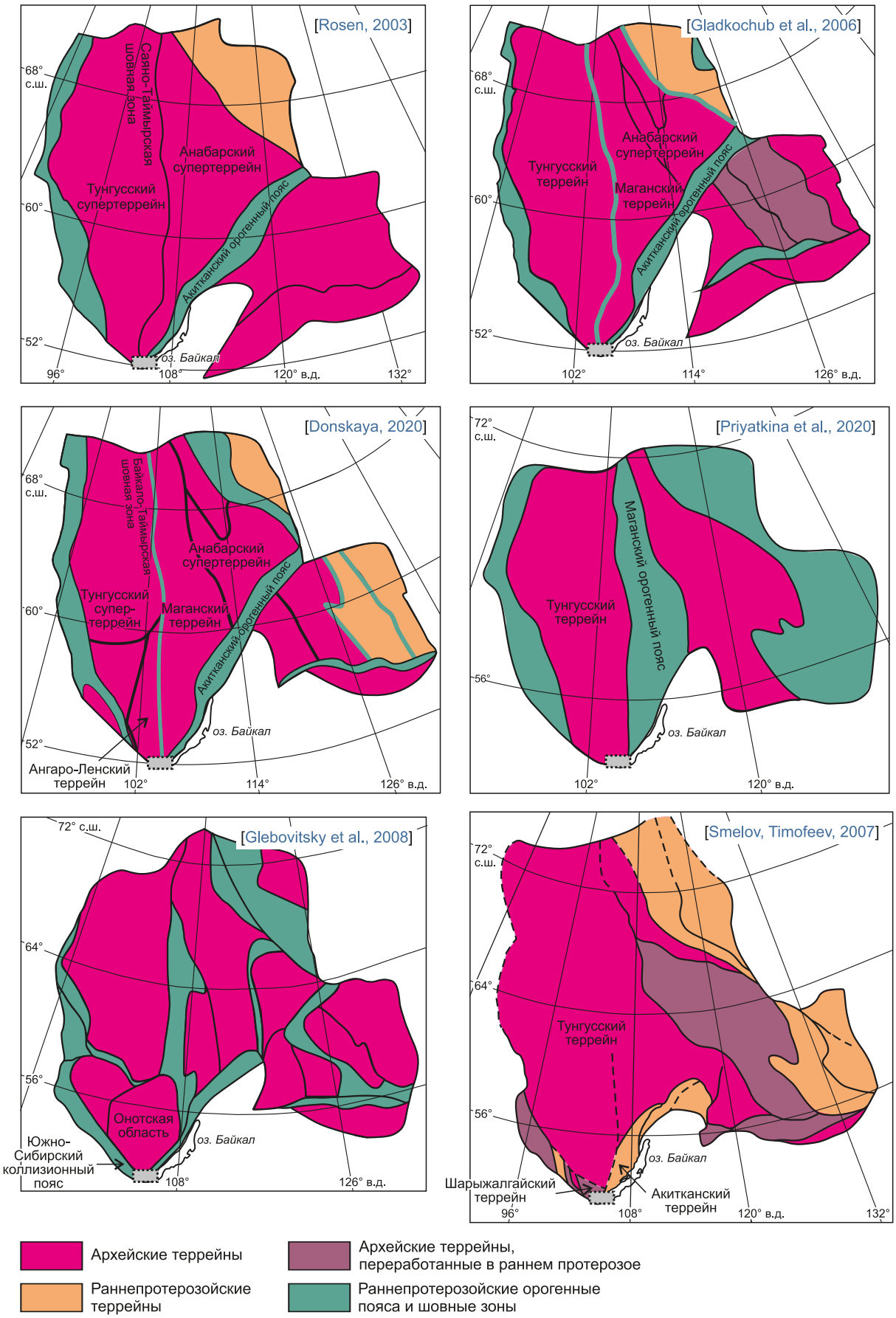


Рис. 1. Схемы тектонического строения Сибирского кратона.

Fig.1. Schemes of tectonic structure of the Siberian craton.

[Rosen et al., 1994; Rosen, 2003] и составленным на их основе схемам Д.П. Гладкочуба с соавторами [Gladkochub et al., 2006], С.А. Писаревского и др. [Pisarevsky et al., 2008], Т.В. Донской [Donskaya, 2020], этот узел включает в себя область соединения архейских Тунгусского и Анабарского супертеррейнов, разделенных Саяно-Таймырской, или Байкало-Таймырской, шовной зоной, и раннепротерозойского Акитканского орогенного пояса (рис. 1). По схеме В.А. Глебовицкого с соавторами [Glebovitsky et al., 2008] это участок объединения архейской Онотской гранит-зеленокаменной тектонической области и раннепротерозойского Южно-Сибирского коллизионного пояса, а по схеме А.П. Смелова и В.Ф. Тимофеева [Smelov, Timofeev, 2007] это зона сочленения архейского Тунгусского, архей-раннепротерозойского Шарыжалгайского и раннепротерозойского Акитканского террейнов. Н.С. Прияткина с соавторами [Priyatkina et al., 2020] проинтерпретировали этот район как область сочленения архейского Тунгусского террейна и раннепротерозойского Маганского орогенного пояса. Следует особо подчеркнуть, что непосредственно узел сочленения этих крупных докембрийских блоков и, соответственно, Саяно-Таймырская, или Байкало-Таймырская, шовная зона перекрыты осадочным чехлом Сибирской платформы, поэтому информацию о времени объединения этих структур можно получить по данным о возрасте пород, наиболее близко расположенных к зоне их соединения. В качестве подобного объекта были выбраны породы Шарыжалгайского выступа фундамента Сибирской платформы в районе пос. Листвянка, т.е. максимально близко расположенные к области сочленения нескольких упомянутых выше крупных литосферных блоков. Для этих пород U-Pb методами SIMS и LA-ICP-MS по циркону был определен возраст протолита и последующих преобразований. Именно последняя оценка возраста и может дать ответ на вопрос о времени финальной консолидации отдельных крупных террейнов в единую структуру Сибирского кратона.

2. КРАТКИЙ ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

Шарыжалгайский выступ фундамента Сибирской платформы, который, согласно большинству тектонических схем, является южной частью Тунгусского супертеррейна, представляет собой выход архейских и раннепротерозойских пород на поверхность (рис. 1, 2). Шарыжалгайский выступ протягивается в северо-западном направлении от южного окончания оз. Байкал до района среднего течения р. Ока. Традиционно в строении Шарыжалгайского выступа выделяют четыре блока, отделенные друг от друга системами разломов: Иркутный и Китойский гранулит-гнейсовые, а также Онотский и Булунский гранит-зеленокаменные (рис. 2, а) [Grabkin, Melnikov, 1980].

Иркутный блок сложен преимущественно метаморфизованными от высокотемпературной амфиболитовой до гранулитовой фации породами, в том числе ортогнейсами разного состава, гранат-биотитовыми и высокоглиноземистыми парагнейсами, метабазитами, мраморами, кварцитами, кальцифирами [Petrova, Levitskii, 1984; Nozhkin, Turkina, 1993; Belichenko et al., 1988; Poller et al., 2005; Sal'nikova et al., 2007; Turkina, Kapitonov, 2019; Turkina, 2023]. Кроме того, значительную площадь Иркутного блока занимают мигматиты и ассоциирующие с ними гранитоиды [Petrova, Levitskii, 1984; Nozhkin, Turkina, 1993; Sal'nikova et al., 2007; Melnikov, 2011]. Китойский блок представлен мраморами и гнейсами, метаморфизованными в высокотемпературной амфиболитовой и гранулитовой фации [State Geological Map..., 2012; Sukhorukov et al., 2020]. Возраст протолитов большей части пород Иркутного и Китойского блоков принято считать архейским с Nd модельным возрастом 2.9–3.9 млрд лет [Poller et al., 2005; Turkina et al., 2009b, 2012; Gladkochub et al., 2009; Turkina, 2010], однако для части метатерригенных пород Иркутного блока установлено раннепротерозойское время осадконакопления и Nd модельный возраст, варьирующийся в интервале 2.4–3.1 млрд лет [Turkina, Urmatseva, 2009; Turkina et al., 2010]. В настоящее время надежно обоснованы два временных рубежа проявления метаморфических и сопряженных с ними магматических событий в пределах Иркутного и Китойского блоков: позднеархейский – 2.48–2.65 млрд лет и раннепротерозойский – 1.85–1.88 млрд лет [Aftalion et al., 1991; Didenko et al., 2003; Levitskii et al., 2004, 2010; Poller at al., 2004, 2005; Gladkochub et al., 2005; Sal'nikova et al., 2007; Turkina et al., 2009b, 2012; Glebovitskii et al., 2011; Levchenkov et al., 2012; Sukhorukov et al., 2020; Turkina, 2022; Turkina, Sukhorukov, 2022]. Онотский и Булунский гранит-зеленокаменные блоки сложены чередованием пластин, в которых представлены ассоциации тоналит-трондьемит-гранодиоритового состава (ТТГ) и метаосадочно-вулканогенные образования зеленокаменных поясов [Nozhkin et al., 2001; Turkina, Nozhkin, 2008; Turkina, 2010]. Возраст пород ТТГ ассоциации Онотского блока составляет 3.3 и 3.4 млрд лет [Bibikova et al., 1982, 2006], а Булунского блока – 3.25 и ~3.30 млрд лет [Turkina et al., 2009a]. Формирование осадочно-вулканогенных образований Онотского зеленокаменного пояса имело место в мезоархее (~2.88 млрд лет) [Turkina et al., 2020, 2022]. Возраст метаморфических преобразований пород Онотского пояса определен как 1.88 млрд лет [Turkina, Nozhkin, 2008].

Метаморфические породы всех блоков Шарыжалгайского выступа прорваны постколлизионными гранитоидами, реже – габброидами и долеритами с возрастом 1.84–1.87 млрд лет, входящими в состав Южно-Сибирского постколлизионного магматического пояса [Donskaya et al., 2002, 2005; Levitskii et al., 2002; Didenko et al., 2005; Turkina et al., 2006; Gladkochub et al., 2013; Ernst et al., 2016; Mekhonoshin et al., 2016; Turkina, Kapitonov, 2017, 2019; Ivanov et al., 2019; Donskaya, Gladkochub, 2021; Turkina, Izokh, 2023], а также мезопротерозойскими и неопротерозойскими дайками долеритов [Gladkochub et al., 2007, 2019, 2023; Donskaya et al., 2018].

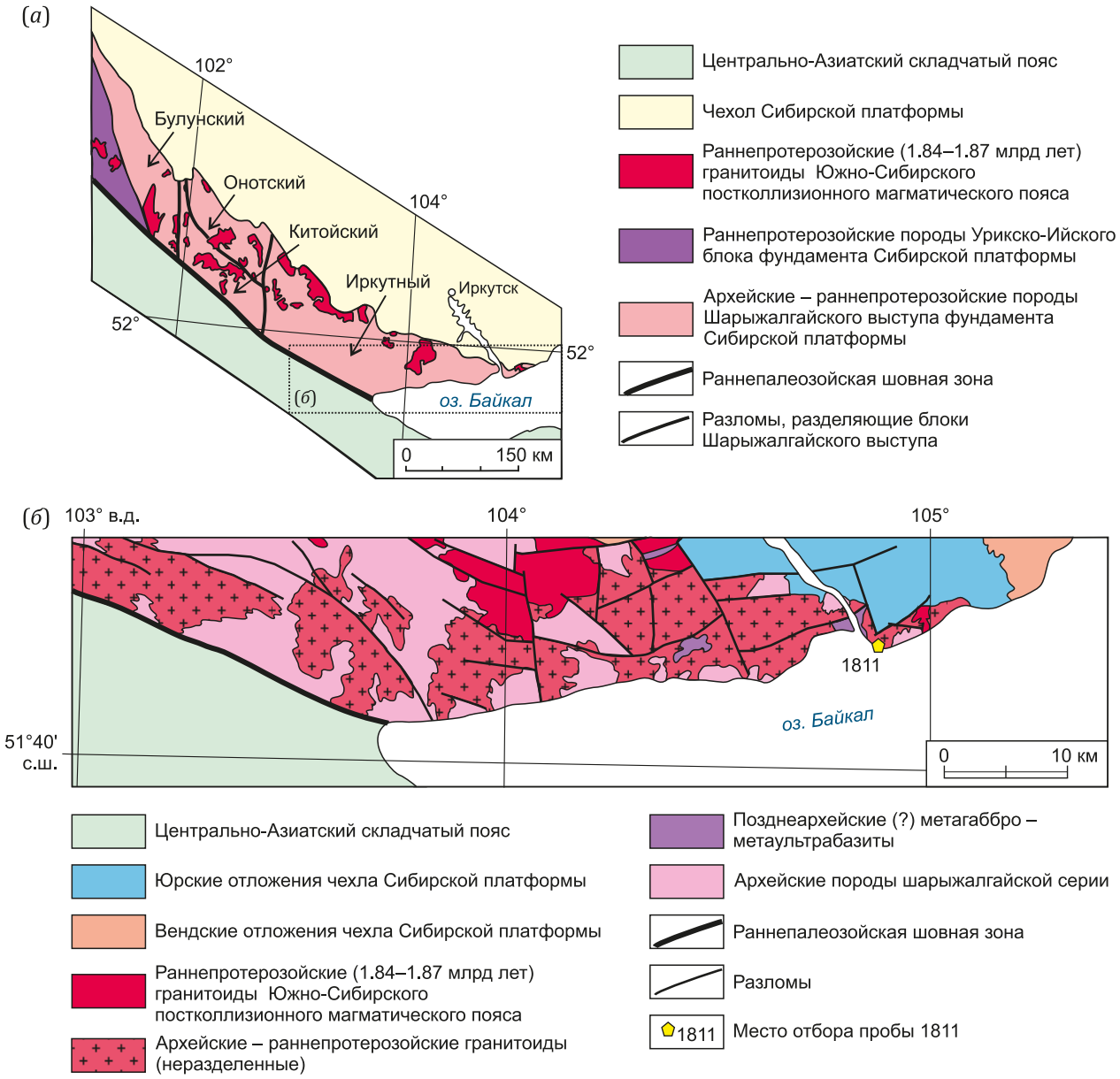


Рис. 2. Упрощенная схема строения Шарыжалгайского выступа фундамента Сибирской платформы (*а*), геологическая карта юго-восточной части Шарыжалгайского выступа фундамента Сибирской платформы (*б*) (модифицированная после [State Geological Map..., 2009; Turkina, 2023]).

Fig. 2. A simplified scheme of the structure of the Sharyzhalgay basement uplift of the Siberian craton (*a*), geological map of the south-eastern Sharyzhalgay basement uplift of the Siberian craton (*б*) modified after [State Geological Map..., 2009; Turkina, 2023]).

3. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для детальных исследований из коренного обнажения на берегу оз. Байкал (рис. 2, б), в южной части пос. Листвянка (координаты 51°50.467' с.ш., 104°53.104' в.д.), была отобрана проба катаклазированного гранодиорита (обр. № 1811). Для этой пробы были выполнены петрографические, геохимические и геохронологические исследования.

Определение содержаний петрогенных оксидов выполнено методом силикатного анализа в ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН по методике [Pashkova et al., 2019]. Определение содержаний редких и редкоземельных элементов выполнено методом ICP-MS на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7900 в ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН (аналитик С.В. Пантеева). Концентрации элементов в образцах рассчитаны относительно международных стандартов BHVO-2, BCR-2, G-2, GSP-2. Химическое разложение проб для ICP-MS анализа проведено методом сплавления с метаборатом лития по методике [Panteeva et al., 2003]. Ошибка определений содержаний редких и редкоземельных элементов методом ICP-MS составляла не более 5 %.

Выделение акцессорного циркона из пробы № 1811 проведено по стандартной методике с использованием тяжелых жидкостей. Изучение его типоморфных

особенностей выполнено при анализе изображений зерен (кристаллов), полученных с помощью сканирующего электронного микроскопа CamScan MX2500S в режимах вторичных электронов и катодолюминесценции (Центр изотопных исследований Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского (ЦИИ ВСЕГЕИ)).

U-Pb геохронологические исследования циркона проведены ЦИИ ВСЕГЕИ, г. Санкт-Петербург, и ЦКП «Геоспектр» Геологического института им. Н.Л. Добрецова СО РАН (ГИН СО РАН), г. Улан-Удэ.

U-Pb изотопный анализ циркона в ЦИИ ВСЕГЕИ проведен на вторично-ионном масс-спектрометре SIMS SHRIMP-IIe. Отобранные вручную представительные зерна циркона были имплантированы в эпоксидную смолу вместе с зернами стандартного циркона TEMORA и 91500, после этого препарат был отполирован и проведено напыление токопроводящим золотом. Измерения изотопов U и Pb на SHRIMP-IIe проведены по методике, описанной в статье [Williams, 1998] и адаптированной в ЦИИ ВСЕГЕИ [Schuth et al., 2012]. Диаметр кратера пробоотбора – 25 мкм при глубине до 2 мкм. Обработка полученных данных выполнена с использованием программы SQUID [Ludwig, 2000]. U-Pb отношения нормализованы на значение 0.0668, приписанное стандартному циркону TEMORA, что соответствует возрасту этого циркона 416.75 млн лет [Black et al., 2003]. Стандарт циркона 91500 с содержанием урана 81.2 г/т и возрастом по $^{206}Pb/^{238}U$ в 1065.4 ±0.6 млн лет [Wiedenbeck et al., 1995] использован как концентрационный стандарт. Построение диаграмм с конкордией проведено с использованием программы ISOPLOT/EX [Ludwig, 1999]. Погрешности единичных анализов (изотопных отношений и возрастов) определены на уровне одной сигмы, погрешности вычисленного конкордантного возраста приводятся на уровне двух сигм.

U-Pb изотопный анализ циркона в ЦКП «Геоспектр» ГИН СО РАН выполнен методом лазерной абляции на масс-спектрометре высокого разрешения Element XR (Thermo Fisher Scientific) с приставкой для лазерного пробоотбора UP-213 с длиной волны излучения 213 нм (New Wave Research) по методике, опубликованной в статьях [Khubanov et al., 2016; Buyantuev et al., 2017]. Диаметр лазерного пучка при абляции составлял 30 мкм. При анализе измерение изотопов проведено в зернах циркона без какого-либо их предварительного отбора (селекции) по размеру или морфологии. Калибровка выполнена с использованием стандартного циркона 91500, имеющего возраст 1065.4±0.6 млн лет [Wiedenbeck et al., 1995]. Цирконовые стандарты Plešovice (337.1±0.4 млн лет [Sláma et al., 2008]) и GJ-1 (608.5±0.4 млн лет [Jackson et al., 2004]) использованы для контроля качества получаемых результатов. Обработка выполненных измерений проведена в программах GLITTER [Griffin et al., 2008] и ISOPLOT [Ludwig, 2008]. В оценке конкордантного возраста учтены только определения, дискордантность (D) которых не превышает 2 %, при этом $D=((^{207}Pb/^{206}Pb)возраст/(^{206}Pb/^{238}U)возраст-1)\cdot100$ %. Табличные данные приведены с ошибкой 1σ. Значения конкордантного возраста оценены с погрешностью 2σ.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследования проводились в самой юго-восточной части Иркутного блока Шарыжалгайского выступа (рис. 2, б). Согласно результатам геологического картирования [State Geological Map..., 2009] здесь выходят на поверхность разнообразные гнейсы, относимые к позднеархейской шарыжалгайской серии, тесно ассоциирующие с ними гнейсограниты, граниты и мигматиты, объединяемые в позднеархейский китойский гнейсогранитовый комплекс, а также прорывающие их раннепротерозойские постколлизионные граниты, мезо- и неопротерозойские дайки долеритов.

Исследованный катаклазированный гранодиорит представляет собой породу серого цвета неоднородной текстуры, как неясно полосчатой, так и реликтовой массивной (рис. 3). Структура реликтовая гранитная (гипидиоморфнозернистая) и наложенная катакластическая (рис. 3). Главные минералы представлены плагиоклазом (37 %), кварцем (30 %) и калиевым полевым шпатом (25 %). Второстепенным минералом является биотит (6 %), а акцессорными – апатит, циркон и рудный минерал. Вторичные изменения выражены хлоритизацией биотита, серицитизацией плагиоклаза, образованием альбитовых микропрожилок. Кроме того, отмечается формирование мелких новообразованных зерен кварца по краям крупных кварцевых зерен, а на отдельных участках зафиксировано скопление крупных зерен кварца линзовидной формы, образующих неясно выраженные полосы с неровными извилистыми краями, по которым развит мелкозернистый кварц.

Гранодиорит имеет содержание SiO_2=65.6 мас. % и сумму (Na_2O+K_2O)=6.2 мас. %. Согласно классификации Б.Р. Фроста с соавторами [Frost et al., 2001] проанализированный гранодиорит имеет магнезиальный ($FeO^{tot}/(FeO^{tot}+MgO)$=0.7), щелочно-известковый (Na_2O+K_2O-CaO=2.8), перглиноземистый (ASI=1.07) состав (Прил. 1, табл. 1.1). Порода обнаруживает повышенное содержание Al_2O_3 (16.1 мас. %) и низкую концентрацию K_2O (1.8 мас. %), что позволяет отнести ее к высокоглиноземистому трондьемит-тоналитовому типу [Barker, Arth, 1976]. Гранодиорит характеризуется низкими содержаниями Y (4.6 г/т) и Nb (6.4 г/т), а также повышенными концентрациями Th (29 г/т), Sr (729 г/т) и Ba (585 г/т). Порода имеет высокие концентрации La (135 г/т), низкие концентрации Yb (0.31 г/т) и, соответственно, сильно фракционированный спектр распределения редкоземельных элементов (La_n/Yb_n=284) при отсутствии европиевой аномалии (Eu/Eu*=1.19) (рис. 4, а). На мультиэлементном спектре гранодиорита присутствуют отрицательные аномалии Nb-Ta и P, а также положительная аномалия Th (рис. 4, б). По своему химическому составу изученный гранодиорит

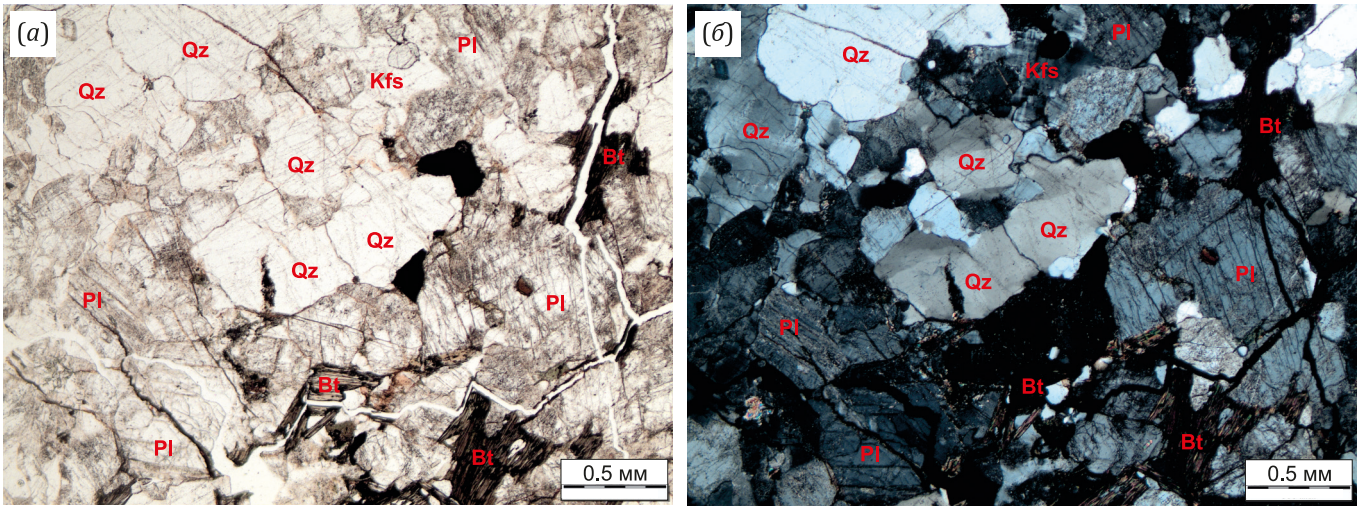


Рис. 3. Микрофотографии шлифа катаклазированного гранодиорита (образец 1811) в параллельных (*а*) и скрещенных (*б*) николях. Bt – биотит, Kfs – калиевый полевой шпат, Pl – плагиоклаз, Qz – кварц.

Fig.3. Microphotographs of cataclastic granodiorite thin section (sample 1811) in parallel (*а*) and crossed (*б*) nicols. Bt – biotite, Kfs – potassium feldspar, Pl – plagioclase, Qz – quartz.

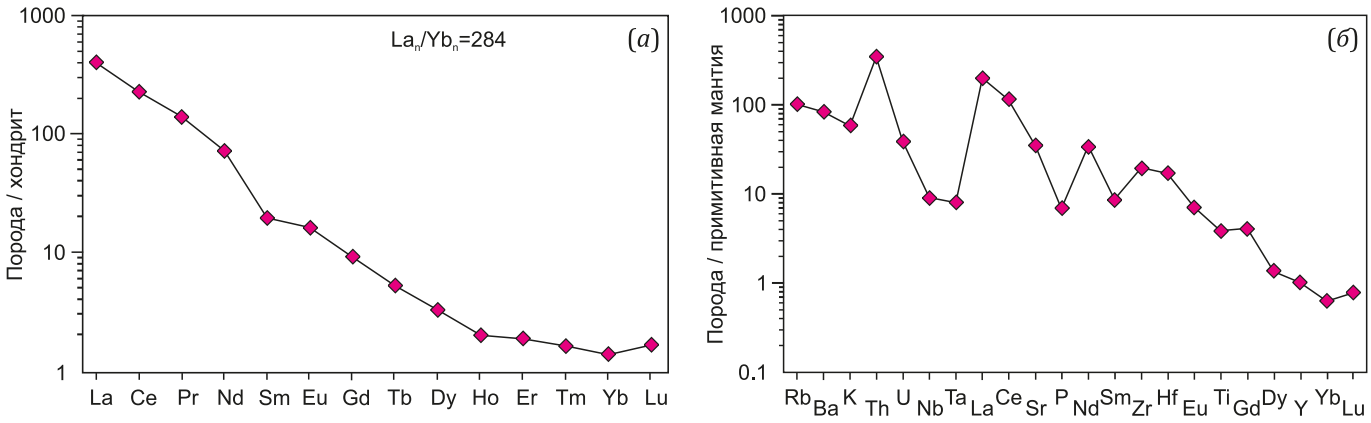


Рис. 4. Спектр распределения редкоземельных элементов (*а*), нормализованный к составу хондрита [Wakita et al., 1970], и мультиэлементный спектр (*б*), нормализованный к составу примитивной мантии [Sun, McDonough, 1989], для катаклазированного гранодиорита (образец 1811).

Fig. 4. Rare-earth elements pattern (*а*), normalized to chondrite composition [Wakita et al., 1970], and multielement spectrum (*б*), normalized to the primitive mantle composition [Sun, McDonough, 1989], for cataclastic granodiorite (sample 1811).

сопоставим с породами ТТГ серии [Condie, 2005; Martin et al., 2005], но отличается от них повышенными содержаниями La и Th.

Из пробы № 1811 был выделен акцессорный циркон, представленный двумя типами кристаллов. Результаты двадцати двух анализов по пятнадцати кристаллам циркона на вторично-ионном масс-спектрометре SHRIMP-IIe отражены в Прил. 1, табл. 1.2, и на рис. 5 и рис. 6. Циркон первого типа представлен прозрачными и полупрозрачными, идиоморфными и субидиоморфными кристаллами. Размер кристаллов циркона изменяется от 250 до 350 мкм, удлинение кристаллов – до 1:3. При микроскопическом изучении в режиме катодолюминесценции в цирконе первого типа наблюдаются зональные ядра и две незональные или слабозональные оболочки (см. рис. 5). Ядра цирконов имеют магматическую осцилляторную зональность, величина $^{232}Th/^{238}U$ варьируется в них в диапазоне от 0.3 до 0.7 (Прил. 1, табл. 1.2; см. рис. 5, зерна 6, 7, 10–15). Широкие (более 100 мкм) краевые части кристаллов циркона обнаруживают пониженную люминесценцию, величина $^{232}Th/^{238}U$ в этих краевых частях составляет 0.1–0.3 (см. рис. 5; Прил. 1, табл. 1.2). Вторая оболочка с высокой люминесценцией преимущественно очень узкая (см. рис. 5), но в отдельных зернах достигает ширины около 40 мкм (см. рис. 5, зерно 2, точка 2.2) и характеризуется величиной $^{232}Th/^{238}U$, равной 1.5 (Прил. 1, табл. 1.2). Циркон второго типа представлен прозрачными субидиоморфными длиннопризматическими кристаллами, которые обнаруживают

Рис. 5. Изображения кристаллов циркона из катаклазированного гранодиорита, выполненные в режиме катодолюминесценции (проба 1811).

Fig. 5. Cathodoluminescence images of zircon crystals from cataclastic granodiorite (sample 1811).

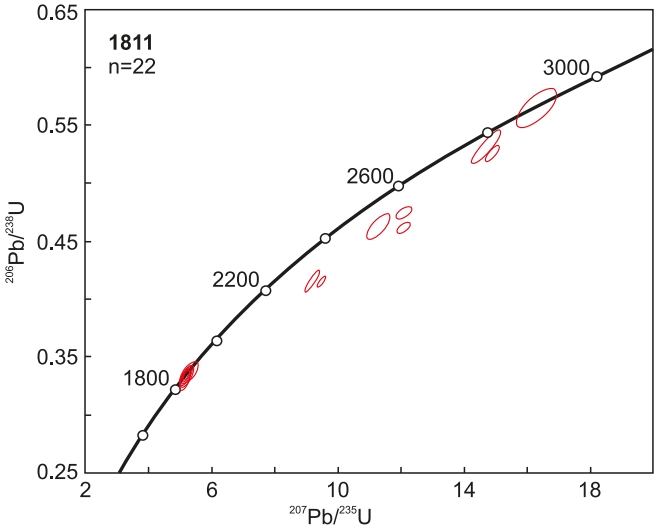
параллельную зональность роста (см. рис. 5, зерна 1, 8). Для циркона этого типа отмечается высокая величина $^{232}Th/^{238}U$ – 1.5–1.7 (Прил. 1, табл. 1.2).

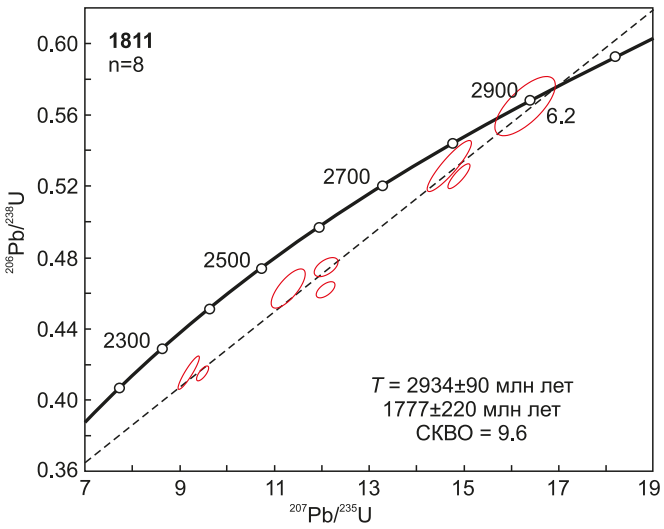
Практически для всех ядер циркона первого типа получены дискордантные значения возраста (рис. 6; Прил. 1, табл. 1.2). Однако изотопный состав ядра одного кристалла (6.2) позволил вычислить конкордантный U-Pb возраст 2893±19 млн лет (рис. 6; Прил. 1, табл. 1.2). Дискордия, построенная по восьми анализам изотопного состава циркона первого типа, дает значения возраста по верхнему пересечению 2934±90 млн лет (рис. 6). Фигуративные точки расположены в верхней части дискордии, близко к ее верхнему пересечению с конкордией, что может свидетельствовать о релевантности оценки возраста по верхнему пересечению. На основании типоморфных особенностей центральных частей кристаллов циркона первого типа, свидетельствующих о его магматическом происхождении, значение в 2893±19 млн лет может быть проинтерпретировано как возраст кристаллизации этих цирконов и, соответственно, архейский возраст образования протолита гранодиорита.

Для циркона второго типа и краевых оболочек циркона первого типа с разной люминесценцией определены близкие конкордантные значения возраста (рис. 6; Прил. 1, табл. 1.2). По четырнадцати анализам был установлен конкордантный U-Pb возраст 1855±6 млн лет (СКВО=0.0039). Типоморфные особенности циркона второго типа указывают на то, что его формирование могло быть связано с процессами частичного плавления, а морфология краевых частей циркона первого типа позволяет предполагать его образование в результате перекристаллизации во время метаморфических преобразований катаклазированных гранодиоритов. Таким образом, возраст 1855±6 млн лет можно рассматривать как время проявления метаморфических событий в породах Шарыжалгайского выступа фундамента Сибирской платформы.

Кроме анализа кристаллов циркона методом SIMS, был проведен U-Pb изотопный анализ циркона из пробы 1811 методом LA-ICP-MS. Всего было проанализировано 110 кристаллов циркона, из которых 56 кристаллов имеют конкордантный U-Pb возраст с D<2 (рис. 7; Прил. 1, табл. 1.3). Порог D<2 подобран, чтобы исключить квазиконкордантные изотопные отношения. Цирконы с конкордантными значениями возраста составляют два кластера. Для шести кристаллов циркона «древнего» кластера был рассчитан возраст в 2889±16 млн лет (СКВО=0.19), а для сорока двух кристаллов циркона «молодого» кластера – 1864±5 млн лет (СКВО=0.54) (рис. 7; Прил. 1, табл. 1.3). Остальные 54 кристалла циркона обнаруживают дискордантные значения возраста во временном интервале между отмеченными выше значениями (рис. 7; Прил. 1, табл. 1.3).

Таким образом, проведенные исследования циркона из пробы катаклазированного гранодиорита № 1811 методами SIMS и LA-ICP-MS показали полное совпадение полученных значений возраста в пределах ошибок определения, что позволяет с доверием относиться к этим результатам.





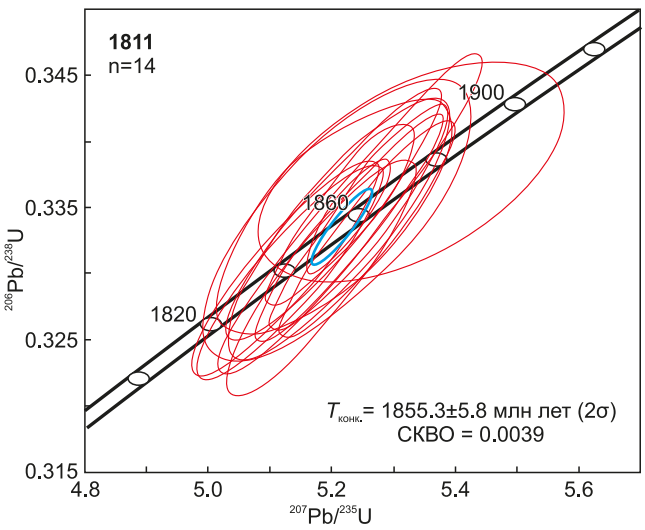
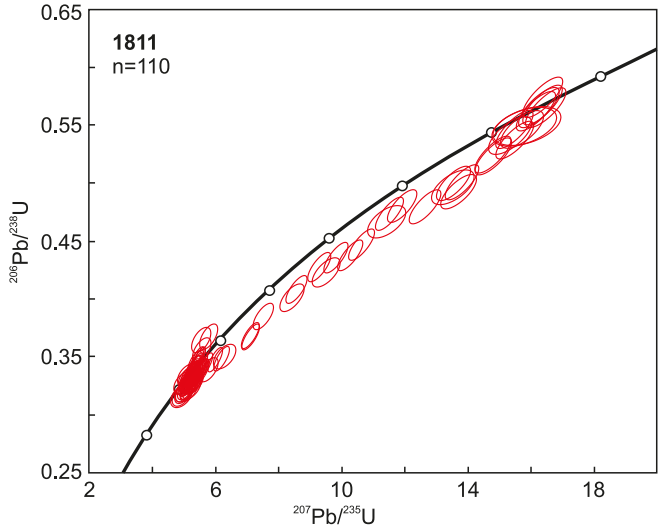
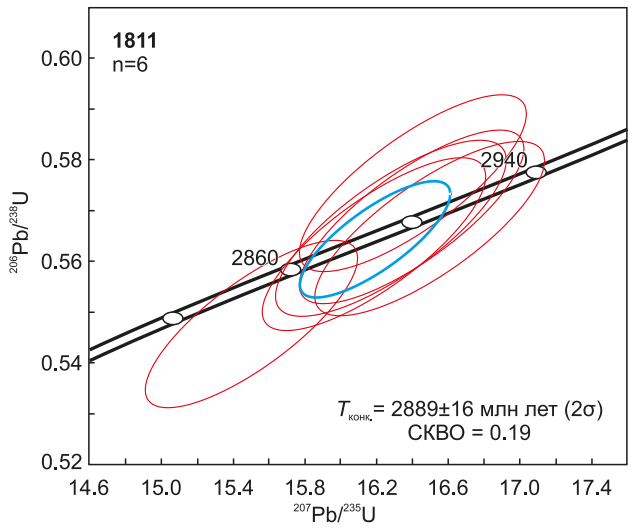


Рис. 6. U-Pb диаграммы с конкордией для циркона из катаклазированного гранодиорита (проба 1811), полученные методом SIMS.

Fig.6. SIMS U-Pb concordia diagrams for zircon from cataclastic granodiorite (sample 1811).





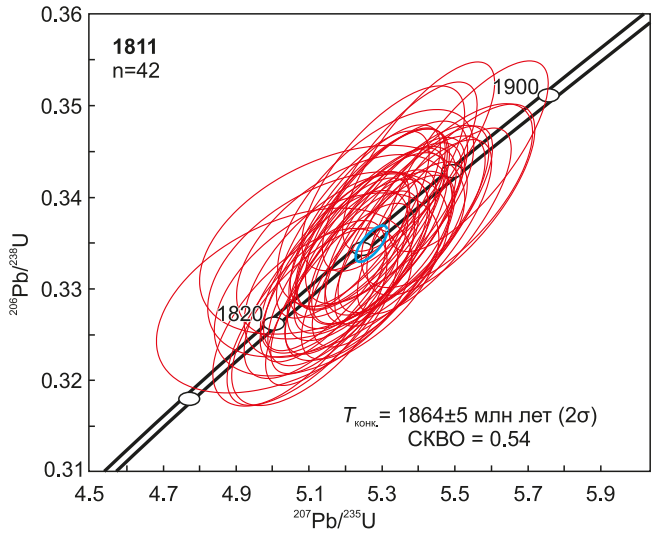


Рис. 7. U-Pb диаграммы с конкордией для циркона из катаклазированного гранодиорита (проба 1811), полученные методом LA-ICP-MS.

Fig. 7. LA-ICP-MS U-Pb concordia diagrams for zircon from cataclastic granodiorite (sample 1811).

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные данные по возрасту и типоморфным особенностям циркона из катаклазированного гранодиорита Иркутного блока Шарыжалгайского выступа позволяют сделать вывод о том, что возраст архейского протолита гранодиорита соответствует временному рубежу около 2.9 млрд лет, о чем свидетельствует возраст и особенности центральных частей кристаллов циркона. По своим геохимическим характеристикам исследованный гранодиорит сопоставим с породами тоналит-трондьемит-гранодиоритовой серии [Condie, 2005; Martin et al., 2005], несколько отличаясь от них повышенными содержаниями La и Th.

До настоящего времени в пределах Иркутного блока Шарыжалгайского выступа магматические породы с возрастом около 2.9 млрд лет были неизвестны. Проведенные ранее исследования показали лишь присутствие магматических кристаллов циркона с возрастом 3.2–3.4 млрд лет в реликтах гранулитов, образованных по магматическим породам среднего состава [Poller et al., 2005; Turkina et al., 2011], а также магматических кристаллов циркона с возрастом около 2.7 млрд лет, отражающих время формирования протолитов позднеархейских гранулитов основного и кислого состава [Turkina et al., 2012]. Однако зерна циркона магматического происхождения с возрастом около 2.9 млрд лет были зафиксированы среди зерен детритового циркона в архейских парагнейсах Иркутного блока [Turkina et al., 2017], что в совокупности с приведенными выше новыми данными по возрасту центральных частей кристаллов циркона из гранодиорита может свидетельствовать о проявлении мезоархейского магматического этапа в пределах юго-восточной части Шарыжалгайского выступа.

Что касается возраста 1.86 млрд лет, полученного для части исследованных кристаллов циркона из гранодиорита, то этот возраст соответствует основному раннепротерозойскому этапу метаморфизма, мигматизации и сопряженного с этими событиями магматизма, которые широко проявлены в Шарыжалгайском выступе фундамента Сибирского кратона на интервале 1.85–1.88 млрд лет [Aftalion et al., 1991; Levitskii et al., 2004; Poller at al., 2004, 2005; Sal'nikova et al., 2007; Turkina et al., 2009b, 2012; Turkina, Sukhorukov, 2017, 2022; Turkina, 2022]. Разнообразные породы, метаморфизованные преимущественно в высокотемпературной амфиболитовой и гранулитовой фациях, широко представлены в Иркутном блоке Шарыжалгайского выступа, а значения возраста метаморфизма, полученные для этих пород, варьируются в диапазоне от 1849 ±13 млн лет до 1880±39 млн лет [Aftalion et al., 1991; Poller et al., 2005; Turkina et al., 2009b, 2010, 2012]. С этими метаморфическими породами и мигматитами пространственно ассоциируют разнообразные гранитоиды с возрастом 1853–1873 млн лет, которые можно рассматривать как синметаморфические образования [Aftalion et al., 1991; Levitskii et al., 2004; Poller at al., 2004, 2005; Sal'nikova et al., 2007].

Таким образом, оценка возраста 1.86 млрд лет, полученная по катаклазированному гранодиориту Шарыжалгайского выступа фундамента Сибирской платформы, отобранному в районе пос. Листвянка, соответствует времени основных метаморфических событий, мигматизации и синметаморфического гранитообразования в Шарыжалгайском выступе, который входит в структуру крупного Тунгусского супертеррейна (см. рис. 1). Следует особо подчеркнуть, что в Шарыжалгайском выступе фундамента метаморфические породы и сопряженные с ними гранитоиды с возрастом 1.85–1.88 млрд лет являются одними из наиболее древних пород раннепротерозойского этапа эволюции южной части Тунгусского супертеррейна, сформированными после достаточно долгого отсутствия здесь проявлений метаморфической и магматической активности, завершившейся в этом регионе на границе архея и раннего протерозоя (2.48–2.65 млрд лет) (обзор в [Donskaya, 2020]). Напротив, в пределах Акитканского орогенного пояса, который, согласно большинству существующих схем тектонического строения Сибирского кратона (см. рис. 1), примыкает к Тунгусскому супертеррейну в его южной части, основные тектонометаморфические события происходили на временном интервале 1.95–1.99 млрд лет [Donskaya et al., 2016; Savelyeva et al., 2019; Donskaya, 2020]. Сам временной интервал 1.95–2.00 млрд лет рассматривается как время формирования Акитканского орогенного пояса, возникшего в результате объединения Анабарского и Алданского супертеррейнов в «ядро» Сибирского кратона [Donskaya et al., 2016; Donskaya, 2020]. Что касается Тунгусского супертеррейна, то он мог развиваться автономно и независимо от остальной части Сибирского кратона до временного рубежа 1.85–1.88 млрд лет, когда и произошло его объединение с «ядром» Сибирского кратона в общую структуру. Также этот временной интервал можно рассматривать как время формирования Саяно-Таймырской, или Байкало-Таймырской, шовной зоны, отделяющей на многих тектонических схемах породы Тунгусского супертеррейна от остальной части кратона. Финальным этапом становления Сибирского кратона является формирование пород Южно-Сибирского постколлизионного магматического пояса, который представляет собой крупную сшивающую структуру, пересекающую все крупные фрагменты докембрийской литосферы, консолидированные в пределах южной части Сибирского кратона.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований показали, что возраст протолита катаклазированного гранодиорита юго-восточной части Иркутного блока Шарыжалгайского выступа (южная часть Тунгусского супертеррейна) соответствует значению около 2.9 млрд лет, а возраст преобразований – значению около 1.86 млрд лет. Изученный гранодиорит обнаруживает повышенное содержание Al_2O_3, низкую концентрацию K_2O, сильно фракционированный спектр распределения

редкоземельных элементов и отсутствие европиевой аномалии.

Полученная для исследованного катаклазированного гранодиорита оценка возраста 1.86 млрд лет соответствует основному раннепротерозойскому этапу метаморфизма и сопряженного с этими событиями магматизма, которые широко проявлены в Шарыжалгайском выступе фундамента, являющегося частью структуры крупного Тунгусского супертеррейна Сибирского кратона. Эта новая оценка возраста, совместно с ранее опубликованными данными по возрасту метаморфических и синхронных с ними магматических событий в Шарыжалгайском выступе фундамента, позволила сделать вывод о присоединении Тунгусского супертеррейна к ранее сформированному ядру Сибирского кратона на временном рубеже 1.85–1.88 млрд лет. По мнению авторов, именно это событие фиксирует финальную стадию консолидации структуры Сибирского кратона как одного из крупнейших фрагментов континентальной литосферы Земли.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность д.г.-м.н. О.М. Туркиной за обсуждение результатов исследований.

8. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

9. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

10. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Aftalion M., Bibikova E.V., Bowes D.R., Hopgood A.M., Perchuk L.L., 1991. Timing of Early Proterozoic Collisional and Extensional Events in the Granulite-Gneiss-Charnokite-Granite Complex, Lake Baikal, USSR: A U-Pb, Rb-Sr and Sm-Nd Isotopic Study. Journal of Geology 99 (6), 851–861. https://doi.org/10.1086/629556.

Barker F., Arth J.G., 1976. Generation of Trondhjemitic-Tonalitic Liquids and Archaean Bimodal Trondhjemite-Basalt Suites. Geology 4 (10), 596–600. https://doi.org/10.1130/0091-7613(1976)4%3C596:GOTLAA%3E2.0.CO;2.

Belichenko V.G., Shmotov A.P., Sezko A.I., Eskin A.S., Vasiliev E.P., Reznitskii L.Z., Boos R.G., Matison O.R., 1988. Precambrian and Paleozoic History of the Crust (Sayan-Baikal Mountain Province). Nauka, Novosibirsk, 161 p. (in Russian) [Беличенко В.Г., Шмотов А.П., Сезько А.И., Ескин А.С., Васильев Е.П., Резницкий Л.З., Боос Р.Г., Матисон О.Р. Эволюция земной коры в докембрии и палеозое (Саяно-Байкальская горная область). Новосибирск: Наука, 1988. 161 с.].

Bibikova E.V., Khiltova V.J., Gracheva T.V., Makarov V.A., 1982. Age of Greenstone Belts of the Prisayanie. Doklady of the USSR Academy of Sciences 267 (5), 1171–1174 (in Russian) [Бибикова Е.В., Хильтова В.Я., Грачева Т.В., Макаров В.А. Возраст зеленокаменных поясов Присаянья // Доклады АН СССР. 1982. Т. 267. № 5. С. 1171–1174].

Bibikova E.V., Turkina O.M., Kirnozova T.I., Fugzan M.M., 2006. Ancient Plagiogneisses of the Onot Block of the Sharyzhalgai Metamorphic Massif: Isotopic Geochronology. Geochemistry International 44, 310–315. https://doi.org/10.1134/S0016702906030098.

Black L.P., Kamo S.L., Allen C.M., Aleinikoff J.N., Davis D.W., Korsch R.J., Foudoulis C., 2003. TEMORA 1: A New Zircon Standard for Phanerozoic U-Pb Geochronology. Chemical Geology 200 (1–2), 155–170. https://doi.org/10.1016/S0009-2541(03)00165-7.

Buyantuev M.D., Khubanov V.B., Vrublevskaya T.T., 2017. U-Pb LA-ICP-MS Dating of Zircons from Subvolcanics of the Bimodal Dyke Series of the Western Transbaikalia: Technique, and Evidence of the Late Paleozoic Extension of the Crust. Geodynamics & Tectonophysics 8 (2), 369–384 (in Russian) [Буянтуев М.Д., Хубанов В.Б., Врублевская Т.Т. U-Pb LA-ICP-MS датирование цирконов из субвулканитов бимодальной дайковой серии Западного Забайкалья: методика, свидетельства позднепалеозойского растяжения земной коры // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 2. С. 369–384]. https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-2-0246.

Condie K.C., 2005. TTGs and Adakites: Are They Both Slab Melts? Lithos 80 (1–4), 33–44. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2003.11.001.

Didenko A.N., Kozakov I.K., Bibikova E.V., Vodovozov V.Yu., Khil'tova V.Ya., Reznitskii L.S., Ivanov A.V., Levitskii V.I., Travin A.V., Shevchenko D.O., Rasskazov S.V., 2003. Paleoproterozoic Granites of the Sharyzhalgai Block, Siberian Craton: Paleomagnetism and Geodynamic Inferences. Doklady Earth Sciences 390 (4), 510–515.

Didenko A.N., Vodovozov V.Yu., Kozakov I.K., Bibikova E.V., 2005. Palaeomagnetic and Geochronological Study of Post-Collisional Early Proterozoic Granitoids in the Southern Siberian Platform: Methodological and Geodynamic Aspects. Izvestiya, Physics of the Solid Earth 41 (2), 156–172.

Donskaya T.V., 2020. Assembly of the Siberian Craton: Constraints from Paleoproterozoic Granitoids. Precambrian Research 348, 105869. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105869.

Donskaya T.V., Gladkochub D.P., 2021. Post-Collisional Magmatism of 1.88–1.84 Ga in the Southern Siberian Craton: An Overview. Precambrian Research 367, 106447. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2021.106447.

Donskaya T.V., Gladkochub D.P., Ernst R.E., Pisarevsky S.A., Mazukabzov A.M., Demonterova E.I., 2018. Geochemistry and Petrogenesis of Mesoproterozoic Dykes of the Irkutsk Promontory, Southern Part of the Siberian Craton. Minerals 8 (12), 545. https://doi.org/10.3390/min8120545.

Donskaya T.V., Gladkochub D.P., Kovach V.P., Mazukabzov A.M., 2005. Petrogenesis of Early Proterozoic Postcollisional Granitoids in the Southern Siberian Craton. Petrology 13 (3), 229–252.

Donskaya T.V., Gladkochub D.P., Mazukabzov A.M., Lepekhina E.N., 2016. Age and Sources of the Paleoproterozoic Premetamorphic Granitoids of the Goloustnaya Block of the Siberian Craton: Geodynamic Applications. Petrology 24, 543–561. https://doi.org/10.1134/S0869591116050040.

Donskaya T.V., Sal'nikova E.B., Sklyarov E.V., Gladkochub D.P., Mazukabzov A.M., Kovach V.P., Yakovleva S.Z., Berezhnaya N.G., 2002. Early Proterozoic Postcollision Magmatism at the Southern Flank of the Siberian Craton: New Geochronological Data and Geodynamic Implications. Doklady Earth Sciences 383 (2), 125–128.

Ernst R.E., Hamilton M.A., Söderlund U., Hanes J.A., Gladkochub D.P., Okrugin A.V., Kolotilina T., Mekhonoshin A.S. et al., 2016. Long-Lived Connection between Southern Siberia and Northern Laurentia in the Proterozoic. Nature Geoscience 9, 464–469. https://doi.org/10.1038/ngeo2700.

Frost B.R., Barnes C.G., Collins W.J., Arculus R.J., Ellis D.J., Frost C.D., 2001. A Geochemical Classification for Granitic Rocks. Journal of Petrology 42 (11), 2033–2048. https://doi.org/10.1093/petrology/42.11.2033.

Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Ernst R.E., Hamilton M.A., Mazukabzov A.M., Pisarevsky S.A., Kamo S., 2019. A New Ectasian Event of Basitic Magmatism in the Southern Siberian Craton. Doklady Earth Sciences 486, 507–511. https://doi.org/10.1134/S1028334X19050222.

Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Mazukabzov A.M., Sal'nikova E.B., Sklyarov E.V., Yakovleva S.Z., 2005. The Age and Geodynamic Interpretation of the Kitoi Granitoid Complex (Southern Siberian Craton). Russian Geology and Geophysics 46 (11), 1121–1133.

Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Mazukabzov A.M., Stanevich A.M., Sklyarov E.V., Ponomarchuk V.A., 2007. Signature of Precambrian Extension Events in the Southern Siberian Craton. Russian Geology and Geophysics 48 (1), 17–31. https://doi.org/10.1016/j.rgg.2006.12.001.

Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Pisarevsky S.A., Kotov A.B., Salnikova E.B., Mekhonoshin A.S., Sklyarov E.V., Demonterova E.I., Mazukabzov A.M., Stepanova A.V., Konstantinov K.M., 2023. Mesoproterozoic (ca. 1.26 Ga) Srednecheremshansk Mafic-Ultramafic Intrusion in the Southern Siberia: Signature of the Mackenzie Event in Siberia. Precambrian Research 390, 107038. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2023.107038.

Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Reddy S.M., Poller U., Bayanova T.B., Mazukabzov A.M., Dril S., Todt W., Pisarevsky S., 2009. Paleoproterozoic to Eoarchean Crustal Growth in Southern Siberia: a Nd-Isotope Synthesis. In: S.M. Reddy, R. Mazumder, D.A.D. Evans, A.S. Collins (Eds), Palaeoproterozoic Supercontinents and Global Evolution. Geological Society of London Special Publications 323, p. 127–143. https://doi.org/10.1144/SP323.6.

Gladkochub D., Pisarevsky S., Donskaya T., Natapov L., Mazukabzov A., Stanevich A., Sklyarov E., 2006. Siberian Craton and Its Evolution in Terms of Rodinia Hypothesis. Episodes 29 (3), 169–174. https://doi.org/10.18814/epiiugs/2006/v29i3/002.

Gladkochub D.P., Pisarevsky S.A., Mazukabzov A.M., Söderlund U., Sklyarov E.V., Donskaya T.V., Ernst R.E., Stanevich A.M., 2013. The First Evidence of Paleoproterozoic Late-Collision Basite Magmatism in the Near-Sayan Salient of the Siberian Craton Basement. Doklady Earth Sciences 450, 583–586. https://doi.org/10.1134/S1028334X13060019.

Glebovitskii V.A., Levchenkov O.A., Levitskii V.I., Rizvanova N.G., Levskii L.K., Bogomolov E.S., Levitskii I.V., 2011. Age Stages of Metamorphism at the Kitoi Sillimanite Schist Deposit, Southeastern Prisayan'e. Doklady Earth Sciences 436, 13–17. https://doi.org/10.1134/S1028334X11010247.

Glebovitsky V.A., Khil'tova V.Ya., Kozakov I.K., 2008. Tectonics of the Siberian Craton: Interpretation of Geological, Geophysical, Geochronological, and Isotopic Geochemical Data. Geotectonics 42, 8–20. https://doi.org/10.1134/S0016852108010020.

Grabkin O.V., Melnikov A.I., 1980. Basement Structure along the Margin of the Siberian Craton (Case Study of the Sharyzhalgai Block). Nauka, Novosibirsk, 95 p. (in Russian) [Грабкин О.В., Мельников А.И. Структура фундамента Сибирской платформы в зоне краевого шва (на примере Шарыжалгайского блока). Новосибирск: Наука, 1980. 95 с.].

Griffin W.L., Powell W.J., Pearson N.J., O'Reilly S.Y., 2008. GLITTER: Data Reduction Software for Laser Ablation ICP-MS. In: P.J. Sylvester (Ed.), Laser Ablation ICP-MS in the Earth Sciences: Current Practices and Outstanding Issues. Mineralogical Association of Canada Short Course Series. Vol. 40. Vancouver, p. 308–311.

Ivanov A.V., Levitskii I.V., Levitskii V.I., Corfu F., Demonterova E.I., Reznitskii L.Z., Pavlova L.A., Kamenetsky V.S., Savatenkov V.M., Powerman V.I., 2019. Shoshonitic Magmatism in the Paleoproterozoic of the South-Western Siberian Craton: An Analogue of the Modern Post-Collision Setting. Lithos 328–329, 88–100. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.01.015.

Jackson S.E., Pearson N.J., Griffin W.L., Belousova E., 2004. The Application of Laser Ablation Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry to in Situ U-Pb Zircon Geochronology. Chemical Geology 211 (1–2), 47–69. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.06.017.

Khubanov V.B., Buyantuev M.D., Tsygankov A.A., 2016. U-Pb Dating of Zircons from PZ3–MZ Igneous Complexes of Transbaikalia by Sector-Field Mass Spectrometry with Laser Sampling: Technique and Comparison with SHRIMP. Russian Geology and Geophysics 57 (1), 190–205. https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.01.013.

Levchenkov O.A., Levitskii V.I., Rizvanova N.G., Kovach V.P., Sergeeva N.A., Levskii L.K., 2012. Age of the Irkut Block of the Prisayan Uplift of the Siberian Platform Basement: Dating Minerals from Metamorphic Rocks. Petrology 20, 86–92. https://doi.org/10.1134/S0869591112010031.

Levitskii V.I., Mel'nikov A.I., Reznitskii L.Z., Bibikova E.V., Kirnozova T.I., Kozakov I.K., Makarov V.A., Plotkina Y.V., 2002. Early Proterozoic Postcollisional Granitoids in Southwestern

Siberian Craton. Russian Geology and Geophysics 43 (8), 717–731.

Levitskii V.I., Reznitskii L.Z., Sal'nikova E.B., Levitskii I.V., Kotov A.B., Barash I.G., Yakovleva S.Z., Anisimova I.V., Plotkina Yu.V., 2010. Age and Origin of the Kitoi Sillimanite Schist Deposit, Eastern Siberia. Doklady Earth Sciences 431, 394–398. http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X1003027X.

Levitskii V.I., Sal'nikova E.B., Kotov A.B., Reznitskii L.Z., Barash I.G., Yakovleva S.Z., Kovach V.P., Mel'nikov A.I., Plotkina Yu.V., 2004. Age of Formation of Apocarbonate Metasomatites of the Sharyzhalgai Uplift of the Siberian Craton Basement, Southwestern Baikal Region: U-Pb Baddeleyite and Zircon Datings. Doklady Earth Sciences 399 (9), 1204–1208.

Ludwig K.R., 1999. User's Manual for ISOPLOT/EX. Version 2.10. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication 1a, 53 p.

Ludwig K.R., 2000. SQUID 1.00: A User's Manual. Berkeley Geochronology Center Special Publication 2, 17 p.

Ludwig K.R., 2008. ISOPLOT 3.70. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. User's Manual. Berkeley Geochronology Center Special Publication 4, 76 p.

Martin H., Smithies R.H., Rapp R., Moyen J.-F., Champion D., 2005. An Overview of Adakite, Tonalite-Trondhjemite-Granodiorite (TTG) and Sanukitoid: Relationships and Some Implications for Crustal Evolution. Lithos 79 (1–2), 1–24. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.04.048.

Mekhonoshin A.S., Ernst R., Söderlund U., Hamilton M.A., Kolotilina T.B., Izokh A.E., Polyakov G.V., Tolstykh N.D., 2016. Relationship between Platinum-Bearing Ultramafic-Mafic Intrusions and Large Igneous Provinces (Exemplified by the Siberian Craton). Russian Geology and Geophysics 57 (5), 822–833. https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.09.020.

Melnikov A.I., 2011. Structural Evolution of Metamorphic Complexes in Precambrian Crystalline shields. GEO, Novosibirsk, 288 p. (in Russian) [Мельников А.И. Структурная эволюция метаморфических комплексов древних щитов. Новосибирск: Гео, 2011. 288 с.].

Nozhkin A.D., Turkina O.M., 1993. Geochemistry of Granulites in the Kan and Sharyzhalgay Complexes. United Institute of Geology, Geophysics and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, 223 p. (in Russian) [Ножкин А.Д., Туркина О.М. Геохимия гранулитов канского и шарыжалгайского комплексов. Новосибирск: ОИГГМ РАН, 1993. 223 с.].

Nozhkin A.D., Turkina O.M., Mel'gunov M.S., 2001. Geochemistry of the Metavolcanosedimentary and Granitoid Rocks of the Onot Greenstone Belt. Geochemistry International 39 (1), 27–44.

Panteeva S.V., Gladkochoub D.P., Donskaya T.V., Markova V.V., Sandimirova G.P., 2003. Determination of 24 Trace Elements in Felsic Rocks by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry after Lithium Metaborate Fusion. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy 58 (2), 341–350. https://doi.org/10.1016/S0584-8547(02)00151-9.

Pashkova G.V., Panteeva S.V., Ukhova N.N., Chubarov V.M., Finkelshtein A.L., Ivanov A.V., Asavin A.M., 2019. Major and Trace Elements in Meimechites – Rarely Occurring Volcanic Rocks: Developing Optimal Analytical Strategy. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis 19 (3), 233–243. https://doi.org/10.1144/geochem2017-099.

Petrova Z.I., Levitskii V.I., 1984. Petrology and Geochemistry of Granulite Complexes in the Baikal Region. Nauka, Novosibirsk, 200 p. (in Russian) [Петрова З.И., Левицкий В.И. Петрология и геохимия гранулитовых комплексов Прибайкалья. Новосибирск: Наука, 1984. 200 с.].

Pisarevsky S.A., Natapov L.M., Donskaya T.V., Gladkochub D.P., Vernikovsky V.A., 2008. Proterozoic Siberia: A Promontory of Rodinia. Precambrian Research 160 (1–2), 66–76. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.04.016.

Poller U., Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Mazukabzov A.M., Sklyarov E.V., Todt W., 2004. Timing of Early Proterozoic Magmatism along the Southern Margin of the Siberian Craton (Kitoy Area). Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences 95 (1–2), 215–225. https://doi.org/10.1017/S0263593300001024.

Poller U., Gladkochub D., Donskaya T., Mazukabzov A., Sklyarov E., Todt W., 2005. Multistage Magmatic and Metamorphic Evolution in the Southern Siberian Craton: Archean and Palaeoproterozoic Zircon Ages Revealed by SHRIMP and TIMS. Precambrian Research 136 (3–4), 353–368. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2004.12.003.

Priyatkina N., Ernst R.E., Khudoley A.K., 2020. A Preliminary Assessment of the Siberian Cratonic Basement with New U-Pb-Hf Detrital Zircon Data. Precambrian Research 340, 105645. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105645.

Rosen O.M., 2003. The Siberian Craton: Tectonic Zonation and Stages of Evolution. Geotectonics 37 (3), 175–192.

Rosen O.M., Condie K.C., Natapov L.M., Nozhkin A.D., 1994. Archean and Early Proterozoic Evolution of the Siberian Craton: A Preliminary Assessment. Archean Crustal Evolution. Developments in Precambrian Geology 11, 411–459. https://doi.org/10.1016/S0166-2635(08)70228-7.

Sal'nikova E.B., Kotov A.B., Levitskii V.I., Reznitskii L.Z., Mel'nikov A.I., Kozakov I.K., Kovach V.P., Barash I.G., Yakovleva S.Z., 2007. Age Constraints of High-Temperature Metamorphic Events in Crystalline Complexes of the Irkut Block, the Sharyzhalgai Ledge of the Siberian Platform Basement: Results of the U-Pb Single Zircon Dating. Stratigraphy and Geological Correlation 15, 343–358. https://doi.org/10.1134/S0869593807040016.

Savelyeva V.B., Danilova Yu.V., Shumilova T.G., Ivanov A.V., Danilov B.S., Bazarova E.P., 2019. Epigenetic Graphitization in the Basement of the Siberian Craton as Evidence of the Migration of Hydrocarbon-Enriched Fluids in the Paleoproterozoic. Doklady Earth Sciences 486, 498–502. https://doi.org/10.1134/S1028334X19050155.

Schuth S., Gornyy V.I., Berndt J., Shevchenko S.S., Sergeev S.A., Karpuzov A.F., Mansfeldt T., 2012. Early Proterozoic U-Pb Zircon Ages from Basement Gneiss at the Solovetsky Archipelago, White Sea, Russia. International Journal Geosciences 3 (2), 289–296. https://doi.org/10.4236/ijg.2012.32030.

Sláma J., Košler J., Condon D.J., Crowley J.L., Gerdes A., Hanchar J.M., Horstwood M.S.A., Morris G.A. et al., 2008. Plešovice Zircon – A New Natural Reference Material for U-Pb

and Hf Isotopic Microanalysis. Chemical Geology 249 (1–2), 1–35. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.11.005.

Smelov A.P., Timofeev V.F., 2007. The Age of the North Asian Cratonic Basement: An Overview. Gondwana Research 12 (3), 279–288. https://doi.org/10.1016/j.gr.2006.10.017.

State Geological Map of the Russian Federation, 2009. Aldan-Transbaikal Series. Scale 1:1000000. Sheet M-48 (Ulan-Ude). Explanatory Note. VSEGEI Publishing House, Saint Petersburg, 271 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия Алдано-Забайкальская. Масштаб 1:1000000. Лист M-48 (Улан-Удэ): Объяснительная записка. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2009. 271 с.].

State Geological Map of the Russian Federation, 2012. Angara-Yenisei Series. Scale 1:1000000. Sheet N-47 (Nizhneudinsk). Explanatory Note. VSEGEI Publishing House, Saint Petersburg, 652 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия Ангаро-Енисейская. Масштаб 1:1000000. Лист N-47 (Нижнеудинск): Объяснительная записка. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2012. 652 с.].

Sukhorukov V.P., Savel'eva V.B., Jiang Y., Li Z., 2020. P-T Path of Metamorphism and U-Pb Monazite and Zircon Age of the Kitoy Terrane: Implication for Neoarchean Collision in SW Siberian Craton. Geoscience Frontiers 11 (6), 1915–1934. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.05.012.

Sun S.-S., McDonough W.F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. Geological Society of London Special Publications 42 (1), 313–345. https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19.

Turkina O.M., 2010. Formation Stages of the Early Precambrian Crust in the Sharyzhalgai Basement Uplift, Southwestern Siberian Craton: Synthesis of Sm-Nd and U-Pb Data. Petrology 18, 158–176. https://doi.org/10.1134/S0869591110020049.

Turkina O.M., 2022. Early Precambrian Crustal Evolution in the Irkut Block (Sharyzhalgai Uplift, Southwestern Siberian Craton): Synthesis of U-Pb, Lu-Hf and Sm-Nd Isotope Data. Russian Geology and Geophysics 63 (2), 137–152. https://doi.org/10.2113/RGG20204255.

Turkina O.M., 2023. Variations in Trace Element and Isotope Composition of Neoarchean Mafic Granulites of the Southwest Siberian Craton: A Consequence of Various Mantle Sources or Crustal Contamination. Petrology 31, 204–222. https://doi.org/10.1134/S0869591123020066.

Turkina O.M., Berezhnaya N.G., Larionov A.N., Lepekhina E.N., Presnyakov S.L., Saltykova T.E., 2009a. Paleoarchean Tonalite-Trondhjemite Complex in the Northwestern Part of the Sharyzhalgai Uplift (Southwestern Siberian Craton): Results of U-Pb and Sm-Nd Study. Russian Geology and Geophysics 50 (1), 15–28. https://doi.org/10.1016/j.rgg.2008.06.014.

Turkina O.M., Berezhnaya N.G., Lepekhina E.N., Kapitonov I.N., 2012. U-Pb (SHRIMP II), Lu-Hf Isotope and Trace Element Geochemistry of Zircons from High-Grade Metamorphic Rocks of the Irkut Terrane, Sharyzhalgay Uplift: Implications for the Neoarchaean Evolution of the Siberian Craton. Gondwana Research 21 (4), 801–817. https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.09.012.

Turkina O.M., Berezhnaya N.G., Urmantseva L.N., Paderin I.P., Skublov S.G., 2009b. U-Pb Isotope and REE Composition of Zircon from the Pyroxene Crystalline Schists of the Irkut Terrane, Sharyzhalgai Uplift: Evidence for the Neoarchean Magmatic and Metamorphic Events. Doklady Earth Sciences 429, 1505–1510. https://doi.org/10.1134/S1028334X09090207.

Turkina O.M., Izokh A.E., 2023. Heterogeneous Subcontinental Lithospheric Mantle below the South Margin of the Siberian Craton: Evidence from Composition of Paleoproterozoic Mafic Associations. Russian Geology and Geophysics 64 (10), 1141–1160. https://doi.org/10.2113/RGG20234575.

Turkina O.M., Izokh A.E., Lavrenchuk A.V., Shelepov Ya.Yu., 2022. Composition and Isotope Parameters of Metabasalts and Gabbroids of the Onot Granite-Greenstone Block, Southwestern Siberian Platform, as Indicators of Lithospheric Mantle Evolution from the Archean to Paleoproterozoic. Petrology 30, 499–522. https://doi.org/10.1134/S0869591122040063.

Turkina O.M., Kapitonov I.N., 2017. Lu-Hf Isotope Composition of Zircon as an Indicator of the Sources for Paleoproterozoic Collisional Granites (Sharyzhalgai Uplift, Siberian Craton). Russian Geology and Geophysics 58 (2), 149–164. https://doi.org/10.1016/j.rgg.2017.01.001.

Turkina O.M., Kapitonov I.N., 2019. The Sources of Paleoproterozoic Collisional Granitoids (Sharyzhalgai Uplift, Southwestern Siberian Craton): from Lithospheric Mantle to Upper Crust. Russian Geology and Geophysics 60 (4), 414–434. https://doi.org/10.15372/RGG2019026.

Turkina O.M., Nozhkin A.D., 2008. Oceanic and Riftogenic Metavolcanic Associations of Greenstone Belts in the Northwestern Part of the Sharyzhalgai Uplift, Baikal Region. Petrology 16, 468–491. https://doi.org/10.1134/S0869591108050044.

Turkina O.M., Nozhkin A.D., Bayanova T.B., 2006. Sources and Formation Conditions of Early Proterozoic Granitoids from the Southwestern Margin of the Siberian Craton. Petrology 14, 262–283. https://doi.org/10.1134/S0869591106030040.

Turkina O.M., Sergeev S.A., Sukhorukov V.P., Rodionov N.V., 2017. U-Pb Age of Zircon from Paragneisses in Granulite Terrane of the Sharyzhalgai Uplift (Southwest of the Siberian Craton): Evidence for the Archean Sedimentation and Evolution of Continental Crust from Eoarchean to Mesoarchean. Russian Geology and Geophysics 58 (9), 1018–1031. https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.07.007.

Turkina O.M., Sukhorukov V.P., 2017. Composition and Genesis of Garnet in the Rocks of Paleoproterozoic Gneiss-Migmatite Complex (Sharyzhalgai Uplift, Southwestern Siberian Craton). Russian Geology and Geophysics 58 (6), 674–691. https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.07.004.

Turkina O.M., Sukhorukov V.P., 2022. Early Precambrian Granitoid Magmatism of the Kitoy Block and Stages of Collisional Events in the Southwestern Siberian Craton. Russian

Geology and Geophysics 63 (5), 620–635. https://doi.org/10.2113/RGG20214385.

Turkina O.M., Sukhorukov V.P., Sergeev S.A., 2020. Mesoarchean Bimodal Volcanic Rocks of the Onot Greenstone Belts, Southwestern Siberian Craton: Implications for Magmatism in an Extension/Rift Setting. Precambrian Research 343, 105731. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105731.

Turkina O.M., Urmantseva L.N., 2009. Metaterrigenous Rocks of the Irkut Granulite-Gneiss Block as Indicators of the Evolution of the Early Precambrian Crust. Lithology and Mineral Resources 44, 43–57. https://doi.org/10.1134/S0024490209010040.

Turkina O.M., Urmantseva L.N., Berezhnaya N.G., Presnyakov S.L., 2010. Paleoproterozoic Age of the Protoliths of Metaterrigenous Rocks in the East of the Irkut Granulite-Gneiss Block (Sharyzhalgai Salient, Siberian Craton). Stratigraphy and Geological Correlation 18, 16–30. https://doi.org/10.1134/S0869593810010028.

Turkina O.M., Urmantseva L.N., Berezhnaya N.G., Skublov S.G., 2011. Formation and Mesoarchean Metamorphism of Hypersthene Gneisses from the Irkut Granulite-Gneiss Block (Sharyzhalgai Uplift in the Southwestern Siberian Craton). Russian Geology and Geophysics 52 (1), 97–108. https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.12.008.

Wakita H., Schmitt R.A., Rey P., 1970. Elemental Abundances of Major, Minor, and Trace Elements in Apollo 11 Lunar Rocks, Soil and Core Samples. In: A.A. Levinson (Ed.), Proceedings of the Apollo 11 Lunar Science Conference (January 5–8, 1970). Vol. 2. Pergammon Press, New York, p. 1685–1717.

Wiedenbeck M., Allé P., Corfu F., Griffin W.L., Meier M., Oberli F., von Quadt A., Roddick J.C., Spiegel W., 1995. Three Natural Zircon Standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, Trace Element and REE Analyses. Geostandards and Geoanalytical Research 19 (1), 1–23. https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.1995.tb00147.x.

Williams I.S., 1998. U-Th-Pb Geochronology by Ion Microprobe. In: M.A. McKibben, W.C. Shanks III, W.I. Ridley (Eds), Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes. Reviews in Economic Geology 7, 1–35. https://doi.org/10.5382/Rev.07.01.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 / APPENDIX 1

Таблица 1.1. Химический состав катаклазированного гранодиорита (обр. 1811) (оксиды в мас. %, редкие и редкоземельные элементы в г/т)

Table 1.1. Chemical composition of cataclastic granodiorite (sample 1811) (oxides are in m-%, rare and rare-earth elements are in g/t)

SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	H_2O	CO_2	п.п.п.	Сумма
65.59	0.83	16.11	1.56	2.77	0.02	1.81	3.37	4.41	1.76	0.15	0.12	0.31	0.82	99.63

Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu
64	729	4.58	220	6.36	585	134.95	204.13	16.74	45.67	3.82	1.18

Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Th	U
2.42	0.25	1.00	0.16	0.38	0.05	0.31	0.03	5.21	0.33	28.96	0.80

Таблица 1.2. Результаты U-Pb анализа кристаллов циркона из катаклазированного гранодиорита (проба № 1811) методом SIMS

Table 1.2. Results of U-Pb analysis (SIMS) of zircon crystals from cataclastic granodiorite (sample 1811)

Образец, кристалл, кратер	$^{206}Pb_c$, %	U, мкг/г	Th, мкг/г	$^{232}Th/^{238}U$	$^{206}Pb^*$, мкг/г	Изотопные отношения						КК	Возраст, млн лет		D, %
						$^{207}Pb^*/^{206}Pb^*$ (1)	± %	$^{207}Pb^*/^{235}U$ (1)	± %	$^{206}Pb^*/^{238}U^*$ (1)	± %		$^{206}Pb/^{238}U$ (1)	$^{207}Pb/^{206}Pb$ (1)	
1811_4.1	0.06	510	122	0.25	145	0.1125	0.5	5.126	1.2	0.3305	1.0	0.90	1841±17	1840±9	0
1811_5.2	0.02	481	140	0.30	136	0.1128	0.5	5.132	1.2	0.3301	1.0	0.90	1839±17	1845±9	0
1811_8.2	0.06	477	116	0.25	137	0.1128	0.5	5.181	1.2	0.3331	1.0	0.90	1853±17	1845±9	0
1811_3.1	0.87	449	128	0.29	130	0.1129	1.1	5.205	1.5	0.3345	1.1	0.71	1860±17	1846±19	–1
1811_2.1	0.03	763	235	0.32	217	0.1131	0.4	5.155	1.1	0.3306	1.0	0.93	1841±16	1850±7	0
1811_7.2	0.03	705	213	0.31	203	0.1131	0.4	5.237	1.1	0.3358	1.0	0.93	1866±17	1850±8	–1
1811_2.2	0.21	138	199	1.49	39.6	0.1131	1.1	5.210	1.7	0.3341	1.3	0.75	1858±20	1850±20	0
1811_5.1	0.02	213	40	0.19	61	0.1133	0.7	5.210	1.4	0.3334	1.2	0.85	1855±19	1853±13	0
1811_9.2	0.03	673	192	0.29	193	0.1136	0.4	5.231	1.2	0.3339	1.1	0.94	1857±19	1858±8	0
1811_1.1	0.01	638	924	1.50	185	0.1136	0.4	5.300	1.1	0.3383	1.0	0.93	1879±17	1858±8	–1
1811_9.1	0.03	1035	92	0.09	297	0.1139	0.4	5.241	1.1	0.3339	1.0	0.95	1857±17	1862±6	0
1811_6.1	0.04	467	92	0.20	132	0.1140	0.5	5.182	1.2	0.3298	1.1	0.89	1838±17	1863±10	1
1811_5.3	0.03	709	183	0.27	203	0.1144	0.4	5.259	1.1	0.3334	1.0	0.93	1855±17	1871±8	1
1811_8.1	1.49	1388	2333	1.74	409	0.1144	1.6	5.329	1.9	0.3377	1.0	0.55	1876±17	1871±28	0
1811_11.1	0.05	354	109	0.32	127	0.1604	0.4	9.190	1.0	0.4154	0.9	0.92	2240±17	2460±7	10
1811_14.1	0.07	441	151	0.35	157	0.1657	0.4	9.483	0.6	0.4150	0.4	0.74	2238±8	2515±6	12
1811_12.1	0.08	359	211	0.61	143	0.1769	0.9	11.290	1.3	0.4626	1.0	0.74	2451±20	2624±15	7
1811_10.1	1.37	374	238	0.66	155	0.1847	0.7	12.090	0.9	0.4746	0.5	0.54	2504±10	2696±12	8
1811_13.1	0.14	462	265	0.59	183	0.1897	0.5	12.079	0.7	0.4619	0.4	0.60	2448±8	2739±9	12
1811_7.1	0.08	161	103	0.66	73.6	0.2005	0.5	14.690	1.3	0.5313	1.1	0.90	2747±26	2830±9	3
1811_15.1	0.03	305	213	0.72	138	0.2055	0.3	14.894	0.6	0.5256	0.5	0.85	2723±12	2871±6	5
1811_6.2	0.04	194	90	0.48	94.4	0.2092	1.2	16.290	1.6	0.5649	1.2	0.71	2887±27	2899±19	0

Примечание. Погрешности приводятся на уровне 1σ. Ошибка в калибровке стандарта составляла 0.46 %. Pb_c и Pb* обозначают обыкновенный и радиогенный свинец, соответственно. (1) – внесена поправка на обыкновенный свинец по измеренному ^{204}Pb. КК – коэффициент корреляции ошибок определения изотопных отношений $^{206}Pb/^{238}U$ и $^{207}Pb/^{235}U$, D – дискордантность. Номера кратеров пробоотбора соответствуют номерам на изображениях цирконов (см. рис. 5).

Note. Errors are at a 1σ. The standard calibration error was 0.46 %. Pb_c and Pb* are common and radiogenic lead, respectively. (1) – ^{204}Pb measurement–based correction to common lead. КК – coefficient of $^{206}Pb/^{238}U$ and $^{207}Pb/^{235}U$ isotopic ratio error correlations, D – discordance. The numbers of sampling craters correspond to the numbers on zircon images (see Fig. 5).

Таблица 1.3. LA-ICP-MS U-Pb изотопные отношения и U-Pb значения возраста циркона из катаклазированного гранодиорита (проба № 1811)

Table 1.3. LA-ICP-MS U-Pb isotopic ratios and U-Pb ages of zircon from cataclastic granodiorite (sample 1811)

№	Th/U	Изотопное отношение						Rho	Изотопный возраст						D, %
		$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ abs	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ abs	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ abs		$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	
1	0.23	0.1126	0.0016	5.1756	0.0816	0.3330	0.0040	0.76	1841	26	1853	19	1849	13	–0.6
2	0.30	0.1145	0.0017	5.3092	0.0855	0.3361	0.0041	0.75	1872	27	1868	20	1870	14	0.2
3	0.23	0.1131	0.0017	5.2703	0.0832	0.3377	0.0040	0.76	1850	26	1876	19	1864	13	–1.4
4	0.24	0.1127	0.0017	5.2548	0.0841	0.3380	0.0041	0.75	1843	27	1877	20	1862	14	–1.8
5	**0.22**	**0.1573**	**0.0023**	**9.3022**	**0.1492**	**0.4288**	**0.0052**	**0.75**	**2427**	**25**	**2300**	**23**	**2368**	**15**	**5.5**
6	**0.24**	**0.1519**	**0.0023**	**8.5782**	**0.1369**	**0.4095**	**0.0049**	**0.75**	**2368**	**25**	**2213**	**22**	**2294**	**15**	**7.0**
7	**0.75**	**0.1798**	**0.0027**	**11.9357**	**0.1905**	**0.4815**	**0.0058**	**0.75**	**2651**	**24**	**2534**	**25**	**2599**	**15**	**4.6**
8	**0.49**	**0.1965**	**0.0030**	**13.5683**	**0.2214**	**0.5010**	**0.0061**	**0.74**	**2797**	**25**	**2618**	**26**	**2720**	**15**	**6.8**
9	0.40	0.1133	0.0017	5.2715	0.0850	0.3376	0.0040	0.74	1853	27	1875	19	1864	14	–1.2
10	**0.79**	**0.2018**	**0.0032**	**13.7296**	**0.2321**	**0.4939**	**0.0061**	**0.73**	**2841**	**26**	**2588**	**26**	**2731**	**16**	**9.8**
11	0.18	0.1131	0.0018	5.1828	0.0881	0.3328	0.0040	0.71	1850	29	1852	19	1850	14	–0.1
12	0.18	0.1144	0.0019	5.2817	0.0907	0.3356	0.0041	0.70	1870	29	1866	20	1866	15	0.2
13	**0.64**	**0.1119**	**0.0018**	**5.3337**	**0.0889**	**0.3464**	**0.0041**	**0.72**	**1830**	**28**	**1918**	**20**	**1874**	**14**	**–4.6**
14	0.27	0.1141	0.0018	5.3129	0.0908	0.3384	0.0041	0.70	1866	29	1879	20	1871	15	–0.7
15	**0.23**	**0.1127**	**0.0018**	**5.3038**	**0.0912**	**0.3421**	**0.0041**	**0.70**	**1844**	**29**	**1897**	**20**	**1870**	**15**	**–2.8**
16	0.24	0.1171	0.0019	5.4785	0.0959	0.3402	0.0041	0.69	1913	29	1888	20	1897	15	1.3
17	**0.43**	**0.1418**	**0.0024**	**7.5257**	**0.1319**	**0.3862**	**0.0047**	**0.69**	**2249**	**28**	**2105**	**22**	**2176**	**16**	**6.8**
18	**0.44**	**0.2092**	**0.0035**	**15.7452**	**0.2787**	**0.5477**	**0.0066**	**0.69**	**2899**	**27**	**2816**	**28**	**2862**	**17**	**3.0**
19	**0.43**	**0.2062**	**0.0036**	**15.3652**	**0.2797**	**0.5424**	**0.0067**	**0.68**	**2876**	**28**	**2794**	**28**	**2838**	**17**	**2.9**
20	0.25	0.1139	0.0020	5.1162	0.0931	0.3270	0.0040	0.67	1863	31	1824	19	1839	15	2.1
21	**0.30**	**0.1528**	**0.0027**	**8.4366**	**0.1573**	**0.4023**	**0.0049**	**0.65**	**2377**	**30**	**2180**	**22**	**2279**	**17**	**9.1**
22	**0.38**	**0.1160**	**0.0021**	**5.2477**	**0.0997**	**0.3296**	**0.0040**	**0.64**	**1896**	**32**	**1836**	**19**	**1860**	**16**	**3.2**
23	**0.37**	**0.1636**	**0.0030**	**9.5207**	**0.1810**	**0.4242**	**0.0052**	**0.64**	**2493**	**30**	**2280**	**23**	**2390**	**17**	**9.4**
24	0.24	0.1132	0.0021	5.0756	0.0976	0.3269	0.0040	0.63	1851	33	1823	19	1832	16	1.5
25	0.27	0.1135	0.0022	5.1768	0.1038	0.3326	0.0041	0.61	1856	35	1851	20	1849	17	0.3
26	**0.53**	**0.1138**	**0.0024**	**5.0585**	**0.1072**	**0.3241**	**0.0041**	**0.59**	**1861**	**37**	**1810**	**20**	**1829**	**18**	**2.8**
27	**0.19**	**0.1242**	**0.0025**	**5.7927**	**0.1216**	**0.3402**	**0.0042**	**0.59**	**2018**	**36**	**1887**	**20**	**1945**	**18**	**6.9**
28	**1.16**	**0.1159**	**0.0023**	**5.1494**	**0.1050**	**0.3241**	**0.0040**	**0.60**	**1894**	**35**	**1810**	**19**	**1844**	**17**	**4.7**
29	**0.39**	**0.1986**	**0.0039**	**13.5453**	**0.2762**	**0.4977**	**0.0061**	**0.60**	**2815**	**32**	**2604**	**26**	**2718**	**19**	**8.1**
30	**0.43**	**0.1146**	**0.0022**	**5.7890**	**0.1171**	**0.3687**	**0.0045**	**0.60**	**1874**	**35**	**2023**	**21**	**1945**	**18**	**–7.4**
31	**0.29**	**0.1169**	**0.0026**	**5.1647**	**0.1152**	**0.3227**	**0.0040**	**0.56**	**1909**	**39**	**1803**	**20**	**1847**	**19**	**5.9**
32	**0.05**	**0.1155**	**0.0024**	**5.1951**	**0.1109**	**0.3288**	**0.0040**	**0.57**	**1887**	**37**	**1832**	**19**	**1852**	**18**	**3.0**
33	**0.88**	**0.1140**	**0.0024**	**5.5695**	**0.1197**	**0.3571**	**0.0043**	**0.57**	**1864**	**37**	**1969**	**21**	**1911**	**19**	**–5.3**
34	**0.63**	**0.1788**	**0.0038**	**11.4436**	**0.2476**	**0.4679**	**0.0057**	**0.56**	**2642**	**35**	**2475**	**25**	**2560**	**20**	**6.7**
35	**0.27**	**0.1137**	**0.0025**	**5.0110**	**0.1123**	**0.3222**	**0.0040**	**0.55**	**1860**	**39**	**1800**	**19**	**1821**	**19**	**3.3**
36	**0.40**	**0.1138**	**0.0026**	**4.9887**	**0.1138**	**0.3207**	**0.0040**	**0.54**	**1861**	**40**	**1793**	**19**	**1817**	**19**	**3.8**
37	**0.60**	**0.1110**	**0.0025**	**5.5521**	**0.1247**	**0.3658**	**0.0045**	**0.54**	**1816**	**39**	**2010**	**21**	**1909**	**19**	**–9.6**
38	**0.10**	**0.1311**	**0.0030**	**6.2968**	**0.1455**	**0.3515**	**0.0043**	**0.53**	**2112**	**39**	**1942**	**21**	**2018**	**20**	**8.8**
39	1.47	0.1137	0.0026	5.1972	0.1207	0.3346	0.0041	0.53	1859	41	1861	20	1852	20	–0.1
40	**1.51**	**0.1181**	**0.0027**	**5.2421**	**0.1233**	**0.3248**	**0.0040**	**0.52**	**1928**	**41**	**1813**	**19**	**1860**	**20**	**6.4**
41	0.30	0.1141	0.0028	5.1486	0.1258	0.3305	0.0041	0.51	1866	43	1841	20	1844	21	1.4
42	**0.22**	**0.1135**	**0.0028**	**4.9328**	**0.1239**	**0.3184**	**0.0040**	**0.50**	**1857**	**44**	**1782**	**19**	**1808**	**21**	**4.2**
43	**0.30**	**0.1170**	**0.0029**	**5.2747**	**0.1316**	**0.3305**	**0.0041**	**0.50**	**1910**	**44**	**1841**	**20**	**1865**	**21**	**3.8**
44	**0.27**	**0.1166**	**0.0029**	**5.2371**	**0.1307**	**0.3294**	**0.0041**	**0.50**	**1904**	**44**	**1835**	**20**	**1859**	**21**	**3.7**

Таблица 1.3 (продолжение)
Table 1.3 (continued)

№	Th/U	Изотопное отношение						Rho	Изотопный возраст						D, %
		$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ abs	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ abs	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ abs		$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	
45	**0.30**	**0.1154**	**0.0029**	**5.1839**	**0.1303**	**0.3293**	**0.0041**	**0.49**	**1886**	**44**	**1835**	**20**	**1850**	**21**	**2.8**
46	**0.35**	**0.1146**	**0.0030**	**5.0319**	**0.1307**	**0.3221**	**0.0040**	**0.48**	**1874**	**46**	**1800**	**20**	**1825**	**22**	**4.1**
47	**0.09**	**0.1154**	**0.0030**	**5.1799**	**0.1339**	**0.3293**	**0.0041**	**0.48**	**1886**	**46**	**1835**	**20**	**1849**	**22**	**2.8**
48	0.10	0.1137	0.0030	5.1529	0.1349	0.3327	0.0041	0.47	1859	46	1851	20	1845	22	0.4
49	**0.23**	**0.1170**	**0.0031**	**5.2718**	**0.1397**	**0.3306**	**0.0041**	**0.47**	**1911**	**47**	**1841**	**20**	**1864**	**23**	**3.8**
50	**0.57**	**0.2111**	**0.0056**	**15.8162**	**0.4195**	**0.5500**	**0.0068**	**0.47**	**2914**	**42**	**2825**	**28**	**2866**	**25**	**3.2**
51	**0.39**	**0.1139**	**0.0032**	**4.9212**	**0.1396**	**0.3174**	**0.0040**	**0.45**	**1863**	**50**	**1777**	**20**	**1806**	**24**	**4.8**
52	**0.56**	**0.2122**	**0.0059**	**15.9014**	**0.4404**	**0.5507**	**0.0069**	**0.45**	**2922**	**44**	**2828**	**29**	**2871**	**26**	**3.3**
53	**0.28**	**0.1172**	**0.0033**	**5.2503**	**0.1484**	**0.3292**	**0.0041**	**0.44**	**1914**	**50**	**1834**	**20**	**1861**	**24**	**4.4**
54	0.44	0.1125	0.0032	5.0323	0.1431	0.3287	0.0041	0.44	1841	51	1832	20	1825	24	0.5
55	0.18	0.1132	0.0033	5.1639	0.1485	0.3354	0.0042	0.44	1852	51	1864	20	1847	24	–0.7
56	0.88	0.1136	0.0023	5.2832	0.1098	0.3388	0.0044	0.62	1857	35	1881	21	1866	18	–1.3
57	**1.87**	**0.1131**	**0.0017**	**5.4280**	**0.0887**	**0.3494**	**0.0043**	**0.76**	**1851**	**27**	**1932**	**21**	**1889**	**14**	**–4.2**
58	0.29	0.1163	0.0017	5.3919	0.0865	0.3376	0.0042	0.77	1901	26	1875	20	1884	14	1.4
59	0.53	0.2092	0.0030	16.1860	0.2547	0.5634	0.0070	0.78	2900	23	2881	29	2888	15	0.7
60	**0.59**	**0.1142**	**0.0016**	**5.4769**	**0.0863**	**0.3493**	**0.0043**	**0.78**	**1867**	**26**	**1931**	**20**	**1897**	**14**	**–3.3**
61	0.74	0.2062	0.0029	15.5024	0.2420	0.5477	0.0067	0.79	2876	23	2816	28	2847	15	2.1
62	**0.36**	**0.1769**	**0.0025**	**11.5331**	**0.1817**	**0.4748**	**0.0058**	**0.78**	**2624**	**24**	**2505**	**26**	**2567**	**15**	**4.8**
63	0.14	0.1151	0.0017	5.3176	0.0857	0.3364	0.0042	0.77	1882	26	1869	20	1872	14	0.7
64	0.24	0.1142	0.0016	5.4009	0.0851	0.3445	0.0042	0.78	1867	26	1908	20	1885	14	–2.1
65	**0.24**	**0.1252**	**0.0018**	**5.9966**	**0.0952**	**0.3488**	**0.0043**	**0.77**	**2032**	**25**	**1929**	**20**	**1975**	**14**	**5.3**
66	**0.36**	**0.1137**	**0.0016**	**5.4111**	**0.0862**	**0.3467**	**0.0043**	**0.77**	**1859**	**26**	**1919**	**20**	**1887**	**14**	**–3.1**
67	0.36	0.1153	0.0019	5.2649	0.0939	0.3325	0.0042	0.71	1885	30	1851	20	1863	15	1.9
68	**0.32**	**0.1639**	**0.0024**	**9.8323**	**0.1564**	**0.4369**	**0.0054**	**0.78**	**2496**	**24**	**2337**	**24**	**2419**	**15**	**6.8**
69	0.30	0.1138	0.0017	5.3492	0.0866	0.3423	0.0042	0.76	1862	26	1898	20	1877	14	–1.9
70	**0.38**	**0.1401**	**0.0021**	**7.1126**	**0.1162**	**0.3697**	**0.0046**	**0.76**	**2229**	**26**	**2028**	**22**	**2126**	**15**	**9.9**
71	**0.35**	**0.1204**	**0.0018**	**5.6926**	**0.0909**	**0.3443**	**0.0042**	**0.77**	**1962**	**26**	**1908**	**20**	**1930**	**14**	**2.9**
72	0.40	0.1137	0.0018	5.2653	0.0899	0.3372	0.0042	0.73	1860	28	1873	20	1863	15	–0.7
73	**0.52**	**0.2052**	**0.0029**	**14.8183**	**0.2340**	**0.5259**	**0.0065**	**0.78**	**2868**	**23**	**2724**	**27**	**2804**	**15**	**5.3**
74	0.39	0.1128	0.0017	5.2204	0.0855	0.3370	0.0042	0.76	1845	27	1872	20	1856	14	–1.5
75	0.24	0.1134	0.0019	5.1471	0.0917	0.3305	0.0042	0.71	1855	30	1841	20	1844	15	0.8
76	0.72	0.2076	0.0030	16.4034	0.2587	0.5754	0.0071	0.78	2887	23	2930	29	2901	15	–1.5
77	**1.34**	**0.1292**	**0.0019**	**6.2000**	**0.1016**	**0.3497**	**0.0043**	**0.76**	**2086**	**26**	**1933**	**21**	**2004**	**14**	**7.9**
78	0.87	0.2100	0.0030	16.3961	0.2560	0.5688	0.0070	0.79	2905	23	2903	29	2900	15	0.1
79	0.33	0.2093	0.0031	16.2806	0.2631	0.5665	0.0071	0.77	2900	24	2894	29	2893	15	0.2
80	**0.55**	**0.1730**	**0.0025**	**10.6462**	**0.1681**	**0.4482**	**0.0055**	**0.78**	**2587**	**24**	**2387**	**25**	**2493**	**15**	**8.4**
81	0.06	0.1159	0.0018	5.3691	0.0917	0.3375	0.0042	0.73	1893	28	1875	20	1880	15	1.0
82	0.16	0.1177	0.0019	5.4892	0.0941	0.3398	0.0043	0.73	1921	28	1886	21	1899	15	1.9
83	**0.78**	**0.2007**	**0.0029**	**13.8375**	**0.2178**	**0.5021**	**0.0062**	**0.78**	**2832**	**23**	**2623**	**27**	**2739**	**15**	**8.0**
84	0.39	0.1161	0.0018	5.3634	0.0898	0.3365	0.0042	0.74	1897	27	1870	20	1879	14	1.5
85	**0.49**	**0.1707**	**0.0025**	**10.2862**	**0.1630**	**0.4390**	**0.0054**	**0.78**	**2564**	**24**	**2346**	**24**	**2461**	**15**	**9.3**
86	0.27	0.1147	0.0017	5.2415	0.0847	0.3329	0.0041	0.76	1875	26	1853	20	1859	14	1.2
87	0.25	0.1159	0.0017	5.2896	0.0858	0.3324	0.0041	0.76	1894	26	1850	20	1867	14	2.4
88	0.25	0.1175	0.0017	5.4438	0.0862	0.3374	0.0041	0.78	1919	25	1874	20	1892	14	2.4
89	**0.25**	**0.1182**	**0.0017**	**5.4749**	**0.0884**	**0.3374**	**0.0042**	**0.76**	**1929**	**26**	**1874**	**20**	**1897**	**14**	**2.9**

Таблица 1.3 (продолжение)
Table 1.3 (continued)

№	Th/U	Изотопное отношение						Rho	Изотопный возраст						D, %
		$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ abs	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ abs	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ abs		$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	
90	0.40	0.1133	0.0018	5.0929	0.0887	0.3274	0.0041	0.72	1853	29	1826	20	1835	15	1.5
91	0.34	0.1161	0.0017	5.3218	0.0868	0.3338	0.0041	0.76	1898	27	1857	20	1872	14	2.2
92	0.46	0.1145	0.0017	5.1989	0.0831	0.3307	0.0041	0.77	1872	26	1842	20	1852	14	1.6
93	**0.16**	**0.1171**	**0.0017**	**5.3188**	**0.0858**	**0.3308**	**0.0041**	**0.76**	**1913**	**26**	**1842**	**20**	**1872**	**14**	**3.8**
94	**0.65**	**0.2099**	**0.0030**	**15.5135**	**0.2451**	**0.5384**	**0.0067**	**0.78**	**2904**	**23**	**2777**	**28**	**2847**	**15**	**4.6**
95	0.42	0.1143	0.0018	5.2072	0.0897	0.3318	0.0042	0.73	1869	29	1847	20	1854	15	1.2
96	**0.19**	**0.1408**	**0.0021**	**7.1229**	**0.1145**	**0.3685**	**0.0046**	**0.77**	**2237**	**25**	**2022**	**21**	**2127**	**14**	**10.6**
97	0.35	0.1145	0.0018	5.2601	0.0897	0.3346	0.0042	0.73	1872	28	1861	20	1862	15	0.6
98	**0.87**	**0.1198**	**0.0019**	**5.5705**	**0.0973**	**0.3387**	**0.0043**	**0.72**	**1953**	**29**	**1880**	**21**	**1912**	**15**	**3.9**
99	**0.48**	**0.1175**	**0.0018**	**5.4230**	**0.0911**	**0.3363**	**0.0042**	**0.74**	**1918**	**27**	**1869**	**20**	**1889**	**14**	**2.6**
100	0.16	0.1147	0.0017	5.1856	0.0834	0.3294	0.0041	0.77	1875	26	1836	20	1850	14	2.1
101	**0.07**	**0.1191**	**0.0017**	**5.5354**	**0.0880**	**0.3384**	**0.0042**	**0.77**	**1943**	**26**	**1879**	**20**	**1906**	**14**	**3.4**
102	0.48	0.1171	0.0017	5.5376	0.0893	0.3445	0.0043	0.77	1912	26	1908	20	1907	14	0.2
103	0.31	0.1144	0.0017	5.2660	0.0843	0.3353	0.0041	0.77	1870	26	1864	20	1863	14	0.3
104	**0.80**	**0.1918**	**0.0028**	**12.6629**	**0.2054**	**0.4809**	**0.0060**	**0.77**	**2758**	**24**	**2531**	**26**	**2655**	**15**	**9.0**
105	**0.14**	**0.1193**	**0.0018**	**5.5607**	**0.0904**	**0.3394**	**0.0042**	**0.76**	**1946**	**26**	**1884**	**20**	**1910**	**14**	**3.3**
106	0.50	0.1134	0.0017	5.1718	0.0840	0.3321	0.0041	0.76	1855	27	1849	20	1848	14	0.4
107	**0.53**	**0.2060**	**0.0030**	**14.8330**	**0.2370**	**0.5244**	**0.0065**	**0.78**	**2875**	**23**	**2718**	**28**	**2805**	**15**	**5.8**
108	**0.23**	**0.1190**	**0.0018**	**5.5149**	**0.0890**	**0.3375**	**0.0042**	**0.76**	**1942**	**26**	**1874**	**20**	**1903**	**14**	**3.6**
109	0.79	0.2121	0.0031	16.4971	0.2618	0.5665	0.0070	0.78	2922	23	2893	29	2906	15	1.0
110	0.08	0.1167	0.0017	5.3861	0.0878	0.3361	0.0042	0.76	1906	27	1868	20	1883	14	2.1

Примечание. Погрешности приводятся на уровне 1σ. Rho – коэффициент корреляции ошибок определения изотопных отношений $^{206}Pb/^{238}U$ и $^{207}Pb/^{235}U$. D – дискордантность: D=(($^{207}Pb/^{206}Pb$ возраст)/($^{206}Pb/^{238}U$ возраст)–1)·100 %. Полужирным шрифтом выделены определения с D>2 %.

Note. Errors are at a 1σ. Rho – coefficient of $^{206}Pb/^{238}U$ and $^{207}Pb/^{235}U$ isotopic ratio error correlations. D – discordance: D=(($^{207}Pb/^{206}Pb$ age)/($^{206}Pb/^{238}U$ age)–1)·100 %. Determinations with D>2 % are in bold.