



ENLARGEMENT OF THE AREA OF THE TIMPTON LARGE IGNEOUS PROVINCE (CA. 1.75 GA) OF THE SIBERIAN CRATON

D. P. Gladkochub^{1,2,3}, T. V. Donskaya¹, R. E. Ernst^{4,5}, U. Söderlund⁶,
A. M. Mazukabzov¹, M. N. Shokhonova¹

¹ Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS, Irkutsk, Russia

² Irkutsk Scientific Center, Siberian Branch of RAS, Irkutsk, Russia

³ Irkutsk State University, Geological Faculty, Irkutsk, Russia

⁴ Carleton University, Ottawa, Canada

⁵ Tomsk State University, Tomsk, Russia

⁶ Lund University, Lund, Sweden

Abstract: We present new geochronological data on dolerites from the Chaya dyke swarm of the Baikal inlier of the Siberian craton. The U–Pb dating of baddeleyite from one dyke located at the SW end of the Chaya dyke swarm yielded an age of 1752 ± 6 Ma, similar to the previously obtained age of a dyke in the NE end of this swarm. These ages establish an age of 1752 Ma for a unified Chaya dyke swarm that extends for more than 200 km in the Baikal inlier of the Siberian craton. These new data confirm that the entire Chaya dyke swarm (as well as the Timpton-Algamay and Eastern Anabar swarms) is a part of an overall radiating dyke swarm belonging to the Late Paleoproterozoic Timpton Large Igneous Province (LIP), the center of which is located in the middle section of the Vilyuy river flow. Thus, the LIP is enlarged to include the area further west in the Siberian craton.

Key words: dolerite; dyke; U–Pb baddeleyite age; Paleoproterozoic; Large Igneous Province (LIP); Siberian craton

RESEARCH ARTICLE

Received: June 14, 2019

Revised: August 22, 2019

Accepted: September 3, 2019

For citation: Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Ernst R.E., Söderlund U., Mazukabzov A.M., Shokhonova M.N., 2019. Enlargement of the area of the Timpton Large Igneous Province (ca. 1.75 Ga) of the Siberian craton. *Geodynamics & Tectonophysics* 10 (4), 829–839. doi:10.5800/GT-2019-10-4-0444.

Funding: Geochronological studies were carried out with the support of the Russian Science Foundation (project No. 18-17-00101), geological studies were supported by the Complex Program for Basic Research of the SB RAS (Integration Project No. 39). The works of R.E. Ernst were partially supported by megagrant 14.Y26.31.0012 of the Government of the Russian Federation.

РАСШИРЕНИЕ АРЕАЛА ТИМПТОНСКОЙ КРУПНОЙ МАГМАТИЧЕСКОЙ ПРОВИНЦИИ (~1.75 МЛРД ЛЕТ) СИБИРСКОГО КРАТОНА

Д. П. Гладкочуб^{1, 2, 3}, Т. В. Донская¹, Р. Е. Эрнст^{4, 5}, У. Седерлунд⁶,
А. М. Мазукабзов¹, М. Н. Шоханова¹

¹ Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

² Иркутский научный центр СО РАН, Иркутск, Россия

³ Иркутский государственный университет, геологический факультет, Иркутск, Россия

⁴ Карлтонский университет, Оттава, Канада

⁵ Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

⁶ Лундский университет, Лунд, Швеция

Аннотация: В статье приводятся результаты геохронологического изучения долеритов чайского дайкового роя Байкальского выступа фундамента Сибирского кратона. Оценка возраста долеритов из юго-западного окончания чайского дайкового роя U-Pb методом по бадделеиту показала, что они имеют возраст 1752 ± 6 млн лет, который совпал с оценкой возраста долеритов в северо-восточном окончании этого роя. На основании полученных результатов был выделен единый чайский дайковый рой протяженностью более 200 км с возрастом 1752 млн лет на территории Байкальского выступа фундамента Сибирского кратона. Новые данные позволили в полном объеме включить чайский дайковый рой совместно с тимптоно-алгамайским и восточно-анабарским дайковыми роями в единый радиальный рой Тимптонской крупной магматической провинции позднего палеопротерозоя, центр которой находится в среднем течении р. Вилюй, и, соответственно, расширить ареал данной крупной магматической провинции далее на запад Сибирского кратона.

Ключевые слова: долерит; дайка; U-Pb возраст по бадделеиту; палеопротерозой; крупная магматическая провинция; Сибирский кратон

1. ВВЕДЕНИЕ

Крупные магматические провинции (КМП) – интереснейшие геологические образования Земли, которые формируются при внедрении большого объема магматических пород, чаще всего основного состава, в течение короткого временного интервала (первые миллионы лет) [Coffin, Eldholm, 1994; Coffins, Eldholm, 2001; D’Acremont et al., 2003; Sauders, 2005; Ernst, 2014; и др.]. Часто в крупные магматические провинции объединяются рой базитовых даек, внедрившиеся на большие территории, например на площади одного или даже нескольких кратонов. В последние годы для протерозойского этапа эволюции Сибирского кратона рой даек основного состава были объединены в несколько КМП на основании надежных Ar-Ar и U-Pb по циркону и бадделеиту оценок возраста. В частности, выделяются Тимптонская (Вилюйская) КМП с возрастом 1752–1759 млн лет [Gladkochub et al., 2010a; Ernst et al., 2016a], Куонамская КМП (около 1500 млн лет [Ernst et al., 2000, 2016b; Veselovskiy et al., 2006; Wingate et al., 2009; Gladkochub et al., 2016; Evans et al., 2016]), Чиресская КМП (около 1385 млн лет [Ernst et al., 2000; Priyatkin et al., 2017; Malyshev

et al., 2018]), Листвяннинская КМП (1338–1350 млн лет [Donskaya et al., 2018; Gladkochub et al., 2019]) и Иркутская КМП (около 725 млн лет [Gladkochub et al., 2007, 2010b; Ernst et al., 2016a]). В то же время отдельные протерозойские дайки и группы даек на площади Сибирского кратона имеют возраст, отличный от возраста выделенных крупных магматических провинций. В некоторых случаях эти дайки фиксируют локальные события растяжения в той или иной части кратона [Rainbird et al., 1998; Gladkochub et al., 2010b; Mekhonoshin et al., 2016; Ernst et al., 2016a]. В других случаях, особенно при условии не совсем надежного определения возраста (K-Ar или Sm-Nd методы), их позиция по отношению к крупным магматическим провинциям не совсем ясна (обзор в [Gladkochub et al., 2010b]). К одной из таких групп даек с неясной позицией относятся дайки юго-западного окончания чайского дайкового роя, прослеживающегося на расстоянии более 200 км в пределах Байкальского краевого выступа фундамента Сибирского кратона [Gladkochub et al., 2007, 2010a].

Для чайского дайкового роя надежный возраст 1752 ± 3 млн лет был определен U-Pb методом по бадделеиту для долеритов северо-восточного окон-

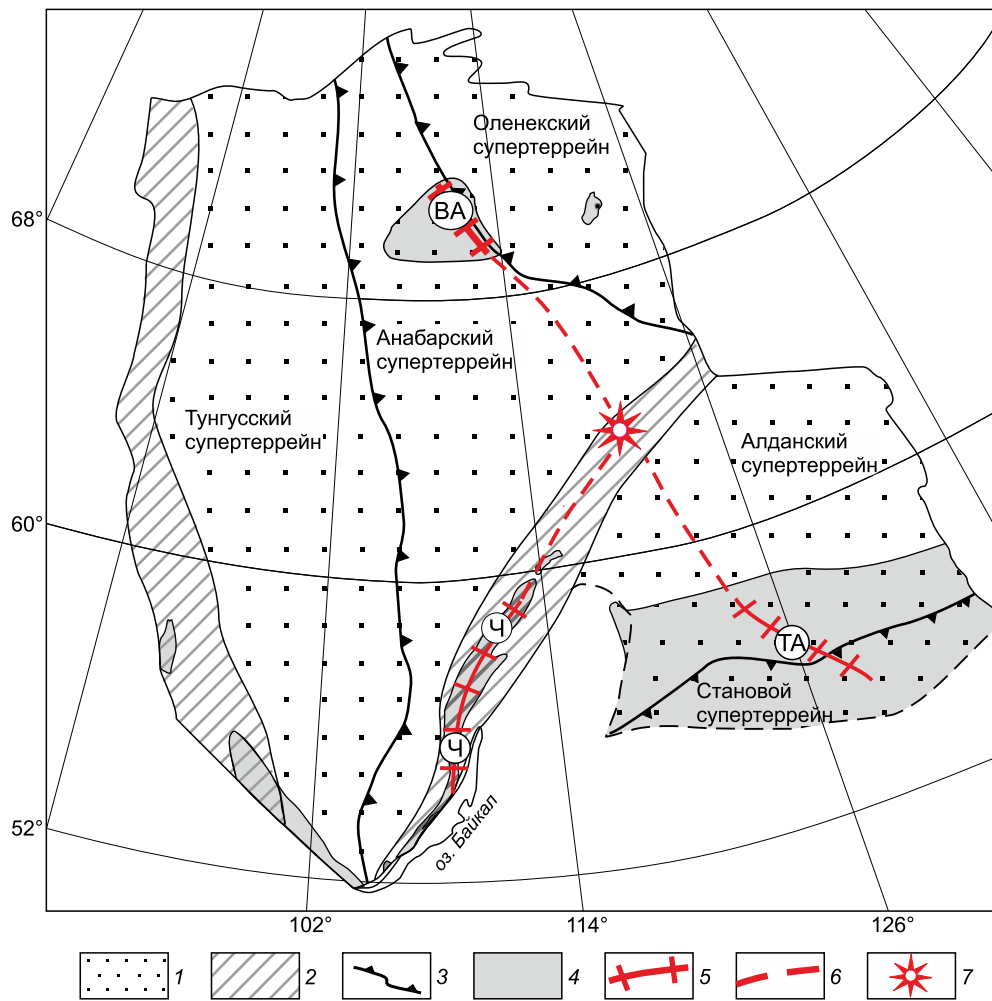


Рис. 1. Схема размещения дайковых роев позднего палеопротерозоя в пределах выступов фундамента Сибирского кратона (модифицированная после [Gladkochub et al., 2010a]).

1 – основные супертеррейны; 2 – палеопротерозойские складчатые пояса; 3 – шовные зоны; 4 – выступы фундамента; 5 – дайковые рои позднего палеопротерозоя (ВА – Восточно-Анабарский, ТА – Тимптоно-Алгамайский, Ч – Чайский); 6 – предполагаемое продолжение дайковых роев под осадочным чехлом; 7 – центр Тимптонской (Вилуйской) крупной магматической провинции.

Fig. 1. Schematic map of the Late Paleoproterozoic dyke swarms in the inliers of the Siberian craton (modified after [Gladkochub et al., 2010a]).

1 – main superterrane; 2 – Paleoproterozoic fold belts; 3 – suture zones; 4 – inliers; 5 – Late Paleoproterozoic dyke swarms (BA – East Anabar, TA – Timpton-Algamay, Ч – Chaya); 6 – assumed continuation of dyke swarms underneath the sedimentary cover; 7 – center of the Timpton (Vilyuy) LIP.

чания роя, что позволило объединить этот дайковый рой совместно с тимптоно-алгамайским и восточно-анабарскими роями в единую Тимптонскую (Вилуйскую) КМП (рис. 1) [Gladkochub et al., 2010a; Ernst et al., 2016a]. Несмотря на близкую структурную позицию и определенное сходство химических составов для всего чайского дайкового роя [Gladkochub et al., 2007; Donskaya et al., 2014], для долерита из юго-западной части этого роя Sm-Nd методом (клинопироксен – плагиоклаз – вал породы) был получен возраст 1674 ± 29 млн лет [Gladkochub et al., 2007]. Подобная оценка возраста либо ставила под сомнение отнесение группы даек юго-западной ча-

сти чайского роя собственно к этому дайковому рою и, соответственно, к Тимптонской КМП, либо позволяла предполагать сложную модель развития единого чайского дайкового роя, когда процессы растяжения начались в северной части распространения дайкового роя и затем продвигались на юго-запад по механизму, близкому к «бегущей трещине» [Gladkochub et al., 2010a]. Для того чтобы решить вопрос об отнесении даек юго-западной части чайского дайкового роя к Тимптонской КМП, были проведены дополнительные геохронологические исследования одной из даек в юго-западной части роя.

В статье приводятся результаты геохронологических исследований долеритов юго-западной части чайского дайкового роя и делаются выводы о масштабах распространения даек Тимптонской КМП на площади Сибирского кратона.

2. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ ДАЕК ДОЛЕРИТОВ

Дайки долеритов, относимые к чайскому дайковому рою в Северном Прибайкалье, прослеживаются на расстояние более чем 200 км от верховьев реки Лены на юге до среднего течения реки Чая на севере (рис. 1) [Gladkochub et al., 2007, 2010a; Donskaya et al., 2014]. Они прорывают раннедокембрийские породы Байкальского выступа фундамента Сибирского кратона и перекрываются неопротерозойскими осадочными отложениями байкальской серии. Объединение даек основного состава Северного Прибайкалья в чайский (могольский) комплекс было сделано Н.А. Срывцевым [Sryvtsev, 1986] и А.А. Бухаровым [Bukharov, 1987]. Простирающиеся интрузивных тел в пределах всего дайкового роя варьируется от северо-восточного до субмеридионального, согласуясь с региональной структурой Байкальского выступа фундамента [Gladkochub et al., 2007; Donskaya et al., 2014]. Как уже было отмечено выше, возраст долеритов в северо-восточном окончании чайского дайкового роя (район среднего течения р. Чая) был определен как 1752 ± 3 млн лет на основании U-Pb оценки по бадделеиту [Gladkochub et al., 2010a], а в юго-западной части дайкового роя Sm-Nd методом как 1674 ± 29 млн лет [Gladkochub et al., 2007].

В юго-западной части чайского дайкового роя (районы ручьев Хибелен, Светлый, мысов Средний Кедровый и Бургунда оз. Байкал) дайки, сложенные долеритами и габбро-долеритами, прорывают архейские гранитоиды кочериковского комплекса, палеопротерозойские метаморфические образования сарминской серии, а также палеопротерозойские гранитоиды и вулканиты Северо-Байкальского вулканоплутонического пояса (рис. 2). Дайки имеют протяженность до 8 км, мощность от первых десятков метров до 250 м и характеризуются субмеридиональным простираем, крутыми углами падения и резкими контактами с вмещающими породами [Gladkochub et al., 2007; Donskaya et al., 2014].

Долериты и габбро-долериты юго-западной части чайского дайкового роя по своему химическому составу соответствуют нормально-щелочным базальтам и трахибазальтам. Породы характеризуются отрицательными значениями $\epsilon Nd(t)$, изменяющимися от -4.5 до -6.5 , и были сформированы в результате плавления контаминированного конти-

нентальной корой мантийного источника [Donskaya et al., 2014].

3. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для оценки возраста долеритов в юго-западной части чайского дайкового роя была отобрана проба долерита № 0259 из дайки мощностью около 100 м, прослеживающейся в среднем течении ручья Светлого, район мыса Хибелен оз. Байкал (координаты $54^{\circ}39.395'$, $108^{\circ}43.542'$) (рис. 2). Долерит представляет собой массивную породу, для которой характерна реликтовая офитовая структура. Главными минералами долерита являются плагиоклаз и клинопироксен. Второстепенные минералы представлены ортопироксеном, роговой обманкой, биотитом, рудными минералами, а в качестве акцессорных минералов отмечаются апатит, циркон, бадделит. В результате воздействия вторичных процессов изученная порода испытала некоторые изменения, выраженные сосюритизацией плагиоклаза, хлоритизацией роговой обманки и биотита.

Выделение бадделеита из пробы долерита № 0259 проводилось в Университете г. Лунд (Швеция) по методике [Söderlund, Johansson, 2002]. Было выделено около 50 зерен бадделеита из 100 граммов пробы. U-Pb изотопные анализы выполнены на масс-спектрометре Finnigan TRITON в Музее естествознания (г. Стокгольм, Швеция). Построение графиков с конкордией проводилось с использованием программы Isoplot 3.0 [Ludwig, 2003]. Все ошибки приведены на уровне 2σ .

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКИХ U-Pb ИССЛЕДОВАНИЙ

Выделенный из пробы долерита № 0259 бадделит представлен коричневыми идиоморфными кристаллами без каких-либо признаков вторичных изменений. Отобранные для датирования зерна бадделеита были разделены на три фракции, по одному или два зерна в каждой (таблица). Полученные результаты приведены в таблице и на рис. 3. На U-Pb диаграмме с конкордией (рис. 3) точки изотопного состава трех фракций бадделеита образуют дискордию, верхнее пересечение которой с конкордией соответствует возрасту 1752 ± 6 млн лет, а нижнее – возрасту 152 ± 340 млн лет (СКВО=0.15). Полученное значение возраста 1752 ± 6 млн лет, отвечающее верхнему пересечению, можно трактовать как возраст кристаллизации бадделеита и, следовательно, как возраст формирования долеритов и габбро-долеритов чайского дайкового роя в его юго-западной части.

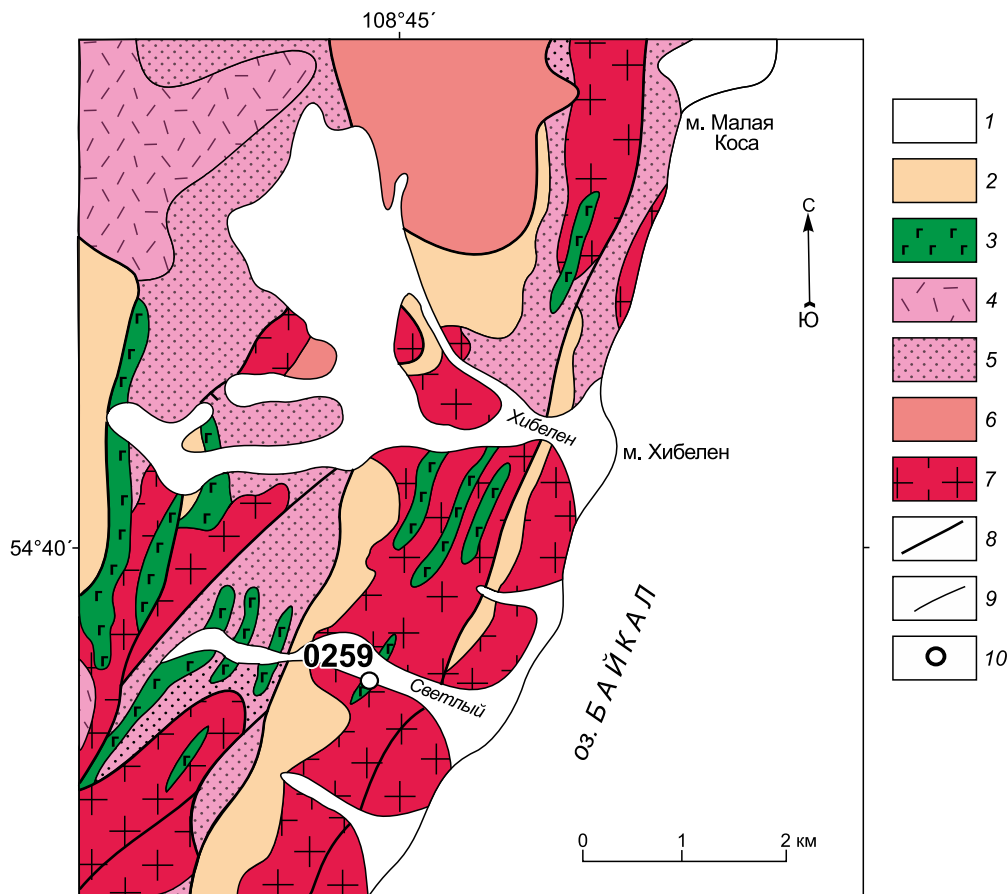


Рис. 2. Схема геологического строения района мыса Хибелен (южная оконечность чайского дайкового роя) (модифицированная после [Gladkochub et al., 2007; Donskaya et al., 2014]).

1 – четвертичные отложения; 2 – неопротерозойские осадочные породы (байкальская серия); 3 – позднепалеопротерозойские дайки долеритов и габбро-долеритов чайского дайкового роя; 4 – палеопротерозойские вулканиты кислого состава акитканской серии Северо-Байкальского вулканоплутонического пояса; 5 – палеопротерозойские осадочно-вулканогенные породы акитканской серии Северо-Байкальского вулканоплутонического пояса; 6 – палеопротерозойские метаморфические породы сарминской серии; 7 – мезоархейские гранитоиды; 8 – разломы; 9 – геологические границы; 10 – место отбора пробы 0259 для геохронологических исследований.

Fig. 2. Schematic geological map of the Cape Khibelen area (the southern end of the Chaya dyke swarm) (modified after [Gladkochub et al., 2007; Donskaya et al., 2014]).

1 – Quaternary deposits; 2 – Neoproterozoic sedimentary rocks (Baikal Group); 3 – Late Paleoproterozoic dykes of dolerites and gabbro-dolerites of the Chaya dyke swarm; 4 – Paleoproterozoic acid volcanics of the Akitkan Group of the North Baikal volcanoplutonic belt; 5 – Paleoproterozoic sedimentary volcanogenic rocks of the Akitkan Group of the North Baikal volcanoplutonic belt; 6 – Paleoproterozoic metamorphic rocks of the Sarma Group; 7 – Mesoarchean granitoids; 8 – faults; 9 – geological boundaries; 10 – locality of geochronological sample 0259.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Новые надежные данные по возрасту долеритов даек в юго-западном окончании чайского дайкового роя показали полную идентичность оценок возраста долеритов в юго-западной и северо-восточной части этого роя (1752 ± 6 и 1752 ± 3 млн лет, соответственно). Что касается оценки возраста долеритов юго-западной части роя, ранее полученной Sm-Nd методом (1674 ± 29 млн лет), о которой упоминалось выше, то она оказалась намного меньше надежно определенного возраста этих пород и не может учиты-

ваться при современных геодинамических реконструкциях. Таким образом, полученные результаты позволили с большой надежностью выделить единый протяженный чайский дайковый рой с возрастом 1752 млн лет на территории Байкальского выступа фундамента Сибирского кратона и в полном объеме включить его в структуру позднепалеопротерозойской Тимптонской (Вилюйской) крупной магматической провинции, центр которой находится в среднем течении р. Вилюй (в современных координатах). Кроме чайского дайкового роя в эту провинцию объединяются базиты тимптоно-алга-

Результаты U-Pb изотопных исследований бадделейта из долерита юго-западного окончания чайского дайкового роа (проба 0259)
 The U-Pb isotopic study results for baddeleyite from dolerite sample 0259 taken at the southwestern end of the Chaya dyke swarm

| Наименование фракции | Количество зерен | U/Th | Pb _c /Pb _{tot} | ²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb, изм. | Изотопные отношения | | | Возраст, млн лет | | | |
|----------------------|------------------|------|------------------------------------|--|-------------------------------------|---------|-------------------------------------|------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| | | | | | ²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U | ±2σ (%) | ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U | ±2σ (%) | ²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U | ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U | ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb |
| Bd-1 | 1 | 15.5 | 0.040 | 1665.5 | 4.5089 | 0.60 | 0.30534 | 0.58 | 1732.6 | 1717.8 | 1750.6±3.8 |
| Bd-2 | 1 | 14.9 | 0.027 | 2286.2 | 4.5221 | 0.36 | 0.30634 | 0.33 | 1735.0 | 1722.7 | 1750.0±2.6 |
| Bd-3 | 2 | 11.3 | 0.043 | 1410.7 | 4.4159 | 0.41 | 0.29943 | 0.34 | 1715.3 | 1688.5 | 1748.2±3.8 |

Примечание. Bdc и Pb_{tot} обозначают обычный и суммарный (радиогенный + бланк + начальный) свинец, соответственно. Измеренные отношения ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb скорректированы на фракционирование и спайк. Измеренные изотопные отношения скорректированы на фракционирование (0.1 % на а.е.м. для Pb), концентрацию спайка, бланк (0.6 пг Pb и 0.06 пг U) и начальный обычный свинец. Поправки на начальный обычный свинец введены в соответствии с модельными величинами [Stacey, Kramers, 1975] и возрастом образца.

Note. Bdc and Pb_{tot} – normal and total (radiogenic + blank + initial) lead, respectively. Measured ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb ratios are corrected for fractionation and spike. Measured isotopic ratios are corrected for fractionation (0.1% per amu for Pb), spike concentration, blank (0.6 pg Pb and 0.06 pg U), and initial common lead. Corrections for the initial common lead are consistent with model values [Stacey, Kramers, 1975] and the age of this sample.

майского дайкового роа Алданского щита с возрастом 1754±5 и 1759±4 млн лет [Ernst et al., 2016a] и долериты восточно-анабарского дайкового роа Анабарского щита, имеющие возраст 1754±27 и 1755±22 млн лет (Ar-Ar оценка возраста по биотиту) [Ernst et al., 2016a].

Внедрение даек Тимптонской КМП на временном рубеже 1752–1759 млн лет происходило в обстановке внутриконтинентального растяжения уже после становления единой структуры Сибирского кратона, завершившегося около 1.85 млрд лет [Gladkochub et al., 2006]. Помимо даек долеритов приблизительно в этот же период (1.74–1.75 млрд лет) в юго-западной части Сибирского кратона (Ангаро-Канский и Бирюсинский выступы фундамента) имело место внедрение внутриплитных гранитоидов А-типа и вулканитов [Turkina et al., 2003, 2006; Nozhkin et al., 2009, 2016], а также накопление терригенных осадков во внутриконтинентальных осадочных бассейнах [Gladkochub et al., 2014; Nozhkin et al., 2016]. Непосредственно перед формированием внутриплитных гранитоидов и вулканитов породы канского комплекса Ангаро-Канского выступа фундамента подверглись метаморфизму в условиях гранулитовой фации на временном рубеже 1.77–1.78 млрд лет [Turkina et al., 2012; Sukhorukov et al., 2018]. Кроме того, несколько позднее, на временном интервале 1.70–1.74 млрд лет, в юго-восточной части Сибирского кратона был сформирован Билякчан-Улканский вулканоплутонический пояс, включающий в себя породы Улкан-Джугджурской анортозит-рапакивигранит-щелочногранитной магматической ассоциации, вулканогенно-осадочные породы улканской и уянской серий, а также небольшие интрузии и дайки долеритов и габбро-долеритов [Didenko et al., 2010; Larin, 2011, 2014; Larin et al., 2012]. В совокупности, все позднепалеопротерозойские события в пределах Сибирского кратона связаны с процессами внутриконтинентального растяжения, которые не привели к разрушению структуры кратона.

В глобальном мировом масштабе конец раннепротерозойской эры (статерий, 1600–1800 млн лет) является одним из наиболее стабильных периодов в истории Земли. К этому времени завершились активные орогенические события в различных регионах мира, сформировался суперконтинент Колумбия приблизительно на временном интервале 1.8–1.9 млрд лет [Zhao et al., 2004; Hou et al., 2008; Evans, Mitchell, 2011; Zhang et al., 2012] и большая часть Земли вступила в устойчивую стадию своего развития. В большинстве регионов отмечается только внутриплитная магматическая активность, выраженная внедрением роев даек основного состава и анорогенных гранитоидов. Также в течение этого периода произошло формиро-

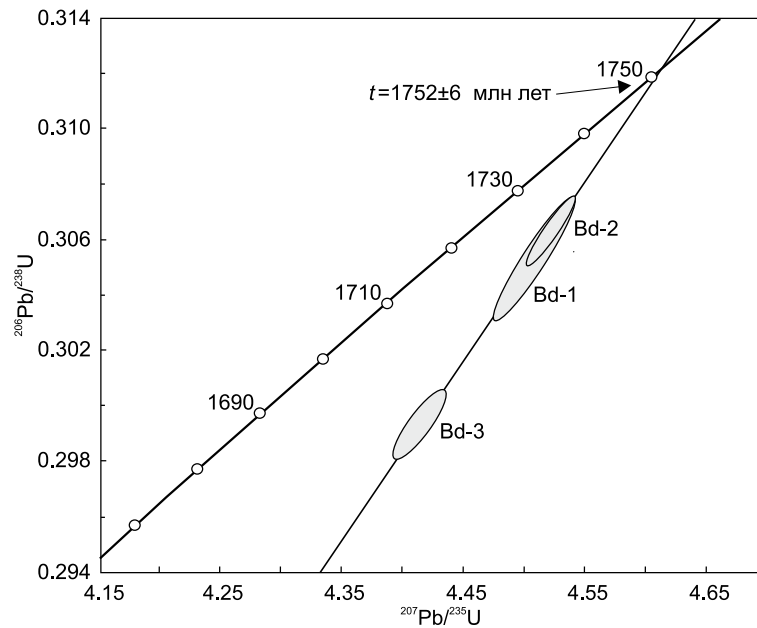


Рис. 3. U-Pb диаграмма с конкордией для бадделеита из долерита юго-западного окончания чайского дайкового роя (проба 0259). Наименования эллипсов на диаграмме соответствуют наименованиям в таблице.

Fig. 3. U-Pb diagram with concordia for baddeleyite from dolerite sample 0259 taken at the southwestern end of the Chaya dyke swarm. The names of ellipses correspond to the names in the table.

вание новых платформ, фиксирующихся на отдельных участках накоплением осадочных отложений чехла, главным образом в пределах внутриконтинентальных рифтовых бассейнов. Близкие по возрасту породам Тимптонской КМП (около 1750 млн лет) дайки основного состава были отмечены в Северной Лаврентии [Peterson et al., 2015; Ernst et al., 2016a] и на Западно-Африканском кратоне [Youbi et al., 2013]. Согласно современным палеоре-конструкциям, внедрение даек этого возраста в пределах отмеченных кратонных блоков фиксирует только события внутриконтинентального растяжения, которые не привели к распаду суперконтинента Колумбия [Youbi et al., 2013; Ernst et al., 2016a].

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

U-Pb методом по бадделеиту установлен возраст долеритов чайского дайкового роя Байкальского выступа фундамента Сибирского кратона в его юго-западной части, который составил 1752 ± 6 млн лет.

Полученное значение возраста долеритов в юго-западной части чайского дайкового роя совпало с оценкой возраста долеритов в северо-восточном окончании этого роя, что дало основание выделить единый чайский дайковый рой протяженностью более 200 км с возрастом 1752 млн лет на террито-

рии Байкальского выступа фундамента Сибирского кратона.

Новые данные по возрасту долеритов позволили в полном объеме включить чайский дайковый рой совместно с тимптоно-алгамайским и восточно-анабарским дайковыми роями в единый радиальный рой позднепалеопротерозойской Тимптонской крупной магматической провинции с центром в среднем течении р. Вилюй и, соответственно, расширить ареал данной крупной магматической провинции далее на запад Сибирского кратона.

Внедрение даек долеритов Тимптонской крупной магматической провинции имело место на временном рубеже 1752–1759 млн лет и происходило в обстановке внутриконтинентального растяжения после становления единой структуры Сибирского кратона.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Геохронологические исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда (проект № 18-17-00101), а геологические исследования при частичной финансовой поддержке Комплексной Программы фундаментальных исследований СО РАН (Интеграционный проект № 39). Работы Р.Э. Эрнста были частично поддержаны мегагрантом 14.Y26.31.0012 правительства Российской Федерации.

8. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Bukharov A.A., 1987. Proto-activated Zones of Ancient Platforms. Nauka, Novosibirsk, 202 p. (in Russian) [Бухаров А.А. Протоактивизированные зоны древних платформ. Новосибирск: Наука, 1987. 202 с.]
- Coffin M.F., Eldholm O., 1994. Large igneous provinces – crustal structure, dimensions, and external consequences. *Reviews of Geophysics* 32 (1), 1–36. <https://doi.org/10.1029/93RG02508>.
- Coffins M.F., Eldholm O., 2001. Igneous provinces. In: J.H. Steele, S.A. Thorpe, K.K. Turekian (Eds.), *Encyclopedia of ocean sciences* (2nd edition). Academic Press, p. 218–225. <https://doi.org/10.1016/B978-012374473-9.00463-X>.
- D'Acromont E., Leroy S., Burov E., 2003. Numerical modelling of a mantle plume: the plume head-lithosphere interaction in the formation of an oceanic large igneous province. *Earth and Planetary Science Letters* 206 (3–4), 379–396. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)01058-0](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)01058-0).
- Didenko A.N., Gur'yanov V.A., Peskov A.Yu., Perestoronin A.N., Avdeev D.V., Bibikova E.V., Kirnozova T.I., Fugzan M.M., 2010. Geochemistry and geochronology of the Proterozoic magmatic rocks of the Ulkan trough: New data. *Russian Journal of Pacific Geology* 4 (5), 398–417. <https://doi.org/10.1134/S1819714010050040>.
- Donskaya T.V., Gladkochub D.P., Ernst R.E., Pisarevsky S.A., Mazukabzov A.M., Demanterova 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., Shokhonova M.N., Mazukabzov A.M., 2014. Late Paleoproterozoic basites of the northern Baikal area: composition and melt sources. *Russian Geology and Geophysics* 55 (11), 1278–1294. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.10.003>.
- Ernst R.E., 2014. *Large Igneous Provinces*. Cambridge University Press, Cornwall, UK, 654 p.
- Ernst R.E., Buchan K.L., Hamilton M.A., Okrugin A.V., Tomshin M.D., 2000. Integrated paleomagnetism and U–Pb geochronology of mafic dikes of the eastern Anabar Shield region, Siberia: implications for Mesoproterozoic paleo-latitude of Siberia and comparison with Laurentia. *The Journal of Geology* 108 (4), 381–401. <https://doi.org/10.1086/314413>.
- Ernst R.E., Hamilton M.A., Söderlund U., Hanes J.A., Gladkochub D.P., Okrugin A.V., Kolotilina T., Mekhonoshin A.S., Bleeker W., Le Cheminant A.N., Buchan K.L., Chamberlain K.R., Didenko A.N., 2016a. Long-lived connection between southern Siberia and northern Laurentia in the Proterozoic. *Nature Geosciences* 9 (6), 464–469. <https://doi.org/10.1038/NNGEO2700>.
- Ernst R.E., Okrugin A.V., Veselovskiy R.V., Kamo S.L., Hamilton M.A., Pavlov V., Söderlund U., Chamberlain K.R., Rogers C., 2016b. The 1501 Ma Kuonamka Large Igneous Province of northern Siberia: U–Pb geochronology, geochemistry, and links with coeval magmatism on other crustal blocks. *Russian Geology and Geophysics* 57 (5), 653–671. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.01.015>.
- Evans D.A.D., Mitchell R.N., 2011. Assembly and breakup of the core of Paleoproterozoic–Mesoproterozoic supercontinent Nuna. *Geology* 39 (5), 443–446. <https://doi.org/10.1130/G31654.1>.
- Evans D.A.D., Veselovsky R.V., Petrov P.Yu., Shatsillo A.V., Pavlov V.E., 2016. Paleomagnetism of Mesoproterozoic margins of the Anabar Shield: A hypothesized billion-year partnership of Siberia and northern Laurentia. *Precambrian Research* 281, 639–655. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2016.06.017>.
- 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 (1), 507–511. <https://doi.org/10.1134/S1028334X19050222>.
- Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Mazukabzov A.M., Pisarevsky S.A., Ernst R.E., Stanevich A.M., 2016. The Mesoproterozoic mantle plume beneath the northern part of the Siberian craton. *Russian Geology and Geophysics* 57 (5), 672–686. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.04.004>.
- 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., Mazukabzov A.M., Stanevich A.M., Donskaya T.V., Motova Z.L., Vanin V.A., 2014. Precambrian sedimentation in the Urik-Iya graben, Southern Siberian craton: Main stages and tectonic settings. *Geotectonics* 48 (5), 359–370. <https://doi.org/10.1134/S0016852114050033>.
- Gladkochub D.P., Pisarevsky S.A., Donskaya T.V., Ernst R.E., Wingate M.T.D., Söderlund U., Mazukabzov A.M., Sklyarov E.V., Hamilton M.A., Hanes J.A., 2010b. Proterozoic mafic magmatism in Siberian craton: An overview and implications for paleocontinental reconstruction. *Precambrian Research* 183 (3), 660–668. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2010.02.023>.
- 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.
- Gladkochub D.P., Pisarevsky S.A., Ernst R., Donskaya T.V., Soderlund U., Mazukabzov A.M., Hanes J., 2010a. Large Igneous Province of about 1750 Ma in the Siberian craton. *Doklady Earth Sciences* 430 (2), 168–171. <https://doi.org/10.1134/S1028334X10020042>.

- Hou G., Santosh M., Qian X., Lister G.S., Li J., 2008. Configuration of the Late Paleoproterozoic supercontinent Columbia: insights from radiating mafic dyke swarms. *Gondwana Research* 14 (3), 395–409. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2008.01.010>.
- Larin A.M., 2011. Rapakivi Granites and Associated Rocks. Nauka, Saint Petersburg, 402 p. (in Russian) [Ларин А.М. Граниты рапакиви и ассоциирующие породы. СПб.: Наука, 2011. 402 с.].
- Larin A.M., 2014. Ulkan-Dzhugdzhur ore-bearing anorthosite-rapakivi granite-peralkaline granite association, Siberian craton: Age, tectonic setting, sources, and metallogeny. *Geology of Ore Deposits* 56 (4), 257–280. <https://doi.org/10.1134/S1075701514040047>.
- Larin A.M., Kotov A.B., Velikoslavinskii S.D., Sal'nikova E.B., Kovach V.P., 2012. Early Precambrian A-granitoids in the Aldan Shield and adjacent mobile belts: Sources and geodynamic environments. *Petrology* 20 (3), 218–239. <https://doi.org/10.1134/S0869591112030034>.
- Ludwig K.R., 2003. Isoplot/EX 3. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, vol. 4, 77 p.
- Malyshev S.V., Pasenko A.M., Ivanov A.V., Gladkochub D.P., Savatenkov V.M., Meffre S., Abersteiner A., Kamenetsky V.S., 2018. Geodynamic significance of the Mesoproterozoic magmatism of the Udzha paleo-rift (northern Siberian craton) based on U-Pb geochronology and paleomagnetic data. *Minerals* 8 (12), 555. <https://doi.org/10.3390/min8120555>.
- Mekhonoshin A.S., Ernst R., Soderlund 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>.
- Nozhkin A.D., Turkina O.M., Bayanova T.B., 2009. Paleoproterozoic collisional and intraplate granitoids of the southwest margin of the Siberian craton: Petrogeochemical features and U-Pb geochronological and Sm-Nd isotopic data. *Doklady Earth Sciences* 428 (1), 1192–1197. <https://doi.org/10.1134/S1028334X09070344>.
- Nozhkin A.D., Turkina O.M., Likhanov I.I., Dmitrieva N.V., 2016. Late Paleoproterozoic volcanic associations in the southwestern Siberian craton (Angara-Kan block). *Russian Geology and Geophysics* 57 (2), 247–264. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.02.003>.
- Peterson T.D., Scott J.M.J., Le Cheminant A.N., Jerson C.W., Pehrsson S.J., 2015. The Kivalliq Igneous Suite: anorogenic bimodal magmatism at 1.75 Ga in the western Churchill Province, Canada. *Precambrian Research* 262, 101–119. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.02.019>.
- Priyatkina N., Collins W.J., Khudoley A., Zastrozhnov D., Ershova V., Chamberlain K., Shatsillo A., Proskurnin V., 2017. The Proterozoic evolution of northern Siberian craton margin: a comparison of U-Pb-Hf signatures from sedimentary units of the Taimyr orogenic belt and the Siberian platform. *International Geology Review* 59 (13), 1632–1656. <https://doi.org/10.1080/00206814.2017.1289341>.
- Rainbird R.H., Stern R.A., Khudoley A.K., Kropachev A.P., Heaman L.M., Sukhorukov V.I., 1998. U-Pb geochronology of Riphean sandstone and gabbro from southeast Siberia and its bearing on the Laurentia–Siberia connection. *Earth and Planetary Science Letters* 164 (3–4), 409–420. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(98\)00222-2](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(98)00222-2).
- Saunder A., 2005. Large igneous provinces: origin and environmental consequences. *Elements* 1 (5), 259–263. <https://doi.org/10.2113/gselements.1.5.259>.
- Söderlund U., Johansson L., 2002. A simple way to extract baddeleyite (ZrO₂). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 3 (2), 1–7. <https://doi.org/10.1029/2001GC000212>.
- Srytsev N.A., 1986. Structure and geochronometry of the Akitkan Group of the Western Baikal region. In: O.V. Grabkin (Ed.), Problems of stratigraphy of Early Precambrian of Middle Siberia. Nauka, Moscow, p. 50–61 (in Russian) [Срытцев Н.А. Строение и геохронометрия аkitканской серии Западного Прибайкалья // Проблемы стратиграфии раннего докембрия Средней Сибири / Ред. О.В. Грабкин. М.: Наука, 1986. С. 50–61].
- Stacey J.S., Kramers J.D., 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth and Planetary Science Letters* 26 (2), 207–221. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(75\)90088-6](https://doi.org/10.1016/0012-821X(75)90088-6).
- Sukhorukov V.P., Gladkochub D.P., Turkina O.M., 2018. The first finding of sapphirine in granulites of the Angara–Kan block: evidence of ultra-high temperature metamorphism in the SW Siberian craton. *Doklady Earth Sciences* 479 (2), 443–447. <https://doi.org/10.1134/S1028334X18040190>.
- Turkina O.M., Berezhnaya N.G., Lepekhina E.N., Kapitonov I.N., 2012. Age of mafic granulites from the Early Precambrian metamorphic complex of the Angara-Kan Terrain (Southwestern Siberian craton): U-Pb and Lu-Hf isotope and REE composition of zircon. *Doklady Earth Sciences* 445 (2), 986–993. <https://doi.org/10.1134/S1028334X12080090>.
- Turkina O.M., Bibikova E.V., Nozhkin A.D., 2003. Stages and geodynamic settings of Early Proterozoic granite formation on the southwestern margin of the Siberian craton. *Doklady Earth Sciences* 389 (2), 159–163.
- 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 (3), 262–283. <https://doi.org/10.1134/S0869591106030040>.
- Veselovskiy R.V., Petrov P.Yu., Karpenko S.F., Kostitsyn Yu.A., Pavlov V.E., 2006. New paleomagnetic and isotopic data on the Mesoproterozoic igneous complex on the northern slope of the Anabar massif. *Doklady Earth Sciences* 411 (8), 1190–1194. <https://doi.org/10.1134/S1028334X06080058>.

Wingate M.T.D., Pisarevsky S.A., Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Konstantinov K.M., Mazukabzov A.M., Stanevich A.M., 2009. Geochronology and paleomagnetism of mafic igneous rocks in the Olenek Uplift, northern Siberia: implications for Mesoproterozoic supercontinents and paleogeography. *Precambrian Research* 170 (3–4), 256–266. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2009.01.004>.

Youbi N., Kouyate D., Soderlund Ulf., Ernst R.E., Soulaïmani A., Hafid A., Ikenne M., El Bahat A., Bertrand H., Rkha Chaham K., Ben Abbou M., Mortaji A., El Ghorfi M., Zouhair M., El Janati M., 2013. The 1750 Ma magmatic event of the West African craton (Anti-Atlas, Morocco). *Precambrian Research* 236, 106–123. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2013.07.003>.

Zhang S.H., Li Z.-X., Evans D.A.D., Wu H., Li H., Dong J., 2012. Pre-Rodinia supercontinent Nuna shaping up: A global synthesis with new paleomagnetic results from North China. *Earth and Planetary Science Letters* 353–354, 145–155. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.07.034>.

Zhao G., Sun M., Wilde S.A., Li S., 2004. A Paleo-Mesoproterozoic supercontinent: assembly, growth and breakup. *Earth-Science Reviews* 67 (1–2), 91–123. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.02.003>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT AUTHORS

Дмитрий Петрович Гладkochуб

докт. геол.-мин. наук, член-корреспондент РАН, директор

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

Иркутский научный центр СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 134, Россия

Иркутский государственный университет, геологический факультет
664003, Иркутск, ул. Ленина, 3, Россия

✉ e-mail: dima@crust.irk.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-7227-8253>

Dmitry P. Gladkochub

Doctor of Geology and Mineralogy, Corresponding Member of RAS,
Director

Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia


Irkutsk Scientific Center, Siberian Branch of RAS
134 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia
Irkutsk State University, Geological Faculty
3 Lenin street, Irkutsk 664003, Russia

Татьяна Владимировна Донская

канд. геол.-мин. наук, в.н.с.

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

e-mail: tanlen@crust.irk.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-1141-0518>

Tatiana V. Donskaya

Candidate of Geology and Mineralogy, Lead Researcher

Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia

Ричард Е. Эрнст

PhD, н.с. по совместительству, профессор

Карлтонский университет, Отделение наук о Земле
1125 Colonel By Drive, Ottawa, Ontario K1S 5B6, Canada

Национальный исследовательский
Томский государственный университет
634050, Томск, пр. Ленина, 36, Россия

e-mail: Richard.Ernst@ErnstGeosciences.com

 <https://orcid.org/0000-0001-9474-0314>

Richard E. Ernst

PhD, Scientist in Residence, Professor

Carleton University, Department of Earth Sciences
1125 Colonel By Drive, Ottawa, Ontario K1S 5B6, Canada

Tomsk State University
36 Lenin ave., Tomsk 634050, Russia

Ульф Седерлунд

PhD, руководитель отдела геологии коренных пород

Лундский университет, Отделение геологии
12 Sölvegatan, SE-223 62 Lund, Sweden

e-mail: ulf.soderlund@geol.lu.se

Ulf Söderlund

PhD, Head of Bedrock Geology

Lund University, Department of Geology
12 Sölvegatan, SE-223 62 Lund, Sweden

Анатолий Муталибович Мазукабзов

докт. геол.-мин. наук, г.н.с.

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

e-mail: mazuk@crust.irk.ru

Anatoly M. Mazukabzov

Doctor of Geology and Mineralogy, Chief Researcher

Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia

Марианна Николаевна Шохонова

м.н.с.

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

e-mail: kyky_kaktyc@mail.ru

Marianna N. Shokhonova

Junior Researcher

Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia