ISSN 2078-502X 💿 🛈



2024 VOLUME 15 ISSUE 2 ARTICLE 0746

# DOI: 10.5800/GT-2024-15-2-0746

# THE REFERENCE GAREVKA GRANITE (YENISEI RIDGE, WESTERN MARGIN OF THE SIBERIAN CRATON): THE FINAL ATTEMPT TO VERIFY PALEOPROTEROZOIC Pb/U ISOTOPIC AGE BY M.I. VOLOBUEV

## A.B. Kuzmichev 💿 🖾, M.K. Danukalova 💿

Geological Institute, Russian Academy of Sciences, 7-1 Pyzhevsky Ln, Moscow 119017, Russia

**ABSTRACT**. The article unravels a confusing history of ideas about the age of the Garevka granite pluton, which is considered as a reference object for the Precambrian of the Yenisei Ridge. Initially, the Paleoproterozoic (1750 Ma) age of granite was determined by M.I. Volobuev and co-authors half a century ago using Pb/U isotope analyses of zircons and orthites. This dating is widely used up to recent to substantiate the Early Precambrian age of the metamorphic rocks of the Trans-Angara region. In 2003, V.A. Vernikovsky and his colleagues published data on the Neoproterozoic (752±3 Ma) age of the massif, obtained with modern technique of isotopic analysis. However, some of experts on the geology of the Yenisei Ridge considered both isotopic ages correct, believing that the eastern part of the massif comprises Paleoproterozoic gneissic granite. Our investigation revealed the following: V.A. Vernikovsky and M.I. Volobuev indeed have collected their granite samples at the western and at the eastern parts of the pluton correspondingly. Krasnoyarsk geologists map the Garevka pluton as part of the Neoproterozoic Glushikha granite suite, but use to apply its Paleoproterozoic dating to substantiate the early Precambrian age of the host rocks. M.I. Volobuev obtained ten mainly discordant Pb/U analyses of the Garevka granites, and six of them form an explicable combination consistent with the age of 1750 Ma. The only concordant analysis with a known sampling point is decisive for the entire system. Thus, to fix the problem, it was necessary to reproduce this analysis using modern isotope techniques. We have dated (SHRIMP) a granite sample collected at the same point. In addition, three more samples from different parts of the massif were analysed to exclude the possible presence of ancient domains in it. The isotope ratios of all analysed zircons form a concordant cluster with an age of 762±7 Ma. The Garevka pluton comprises a separate mappable body composed of biotite leucogranites with fluorite. Granites do not replace some older rocks, but crystallized from the melt, ascended from deep crust. The question about possible Paleoproterozoic age of the Garevka granite pluton or any part of it is closed. Ideas about the wide distribution of Archean and Paleoproterozoic gneisses in the Trans-Angara region require additional geochronological verification. To date, the presence of such rocks has been reliably established here only at two local points.

KEYWORDS: U/Pb geochronology; Precambrian; Neoproterozoic; Yenisei Ridge; granite magmatism

**FUNDING:** The work was supported by the Russian Science Foundation (grant № 23-27-00204).



# **RESEARCH ARTICLE**

Correspondence: Alexander B. Kuzmichev, nsi.kuzmich@yandex.ru

Received: June 26, 2023 Revised: October 3, 2023 Accepted: October 13, 2023

FOR CITATION: Kuzmichev A.B., Danukalova M.K., 2024. The Reference Garevka Granite (Yenisei Ridge, Western Margin of the Siberian Craton): The Final Attempt to Verify Paleoproterozoic Pb/U Isotopic Age by M.I. Volobuev. Geodynamics & Tectonophysics 15 (2), 0746. doi:10.5800/GT-2024-15-2-0746

# РЕФЕРЕНСНЫЙ ГАРЕВСКИЙ ГРАНИТНЫЙ ПЛУТОН ЕНИСЕЙСКОГО КРЯЖА (ЗАПАДНОЕ ОБРАМЛЕНИЕ СИБИРСКОГО КРАТОНА): ФИНАЛЬНАЯ ПОПЫТКА ВОСПРОИЗВЕСТИ ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКИЕ РЬ/U ИЗОТОПНЫЕ ДАТИРОВКИ М.И. ВОЛОБУЕВА

## А.Б. Кузьмичев, М.К. Данукалова

Геологический институт РАН, 119017, Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 1, Россия

АННОТАЦИЯ. В статье обсуждается запутанная история представлений о древнем возрасте Гаревского гранитного массива, который рассматривается как реперный объект для докембрия Енисейского кряжа. Первоначально палеопротерозойский (1750 млн лет) возраст гранитов был установлен М.И. Волобуевым с соавторами полвека назад Pb/U изотопным методом по цирконам и ортитам. Эта датировка широко используется и ныне для обоснования раннедокембрийского возраста метаморфических пород Заангарья. В.А. Верниковский и его коллеги в 2003 г. опубликовали данные о неопротерозойском (752±3 млн лет) возрасте массива, полученные с использованием более современных методов изотопного анализа. Однако ряд экспертов по геологии Енисейского кряжа сочли оба определения изотопного возраста корректными, полагая, что в восточной части массива обнажены палеопротерозойские гнейсограниты. Проведенное расследование выявило следующее. В.А. Верниковский действительно продатировал образец гранита из западной части массива, а М.И. Волобуев – из восточной. Красноярские геологи картируют Гаревский массив в составе неопротерозойского глушихинского гранитного комплекса, но используют палеопротерозойскую датировку гранитов этого же массива для обоснования древнего возраста вмещающих гранитогнейсов. М.И. Волобуевым по гранитам Гаревского массива получено десять, преимущественно дискордантных, анализов, шесть из которых образуют объяснимую систему, согласующуюся с возрастом 1750 млн лет. Определяющим для всей системы является единственный конкордантный анализ с известным пунктом отбора. Таким образом, для решения проблемы необходимо воспроизвести этот анализ, используя современные методики. Нами продатирован (SHRIMP) образец гранита, отобранный в том же пункте. В дополнение проанализированы еще три образца из разных участков массива, чтобы исключить возможное присутствие в нем древних доменов. Изотопные отношения всех проанализированных цирконов образуют единый конкордантный кластер с возрастом 762±7 (2σ) млн лет. Гаревский массив слагает обособленное картируемое тело, целиком сложенное биотитовыми лейкогранитами с флюоритом. Граниты не являются продуктом замещения неких более древних пород, но кристаллизовались из расплава, перемещенного из глубоких горизонтов коры. Вопрос о возможном палеопротерозойском возрасте Гаревского гранитного массива или какой-либо его части закрыт. Представления о широком распространении архейских и палеопротерозойских гранитоидов и метаморфических пород в Заангарье нуждаются в дополнительном геохронологическом обосновании. К настоящему времени присутствие таких пород достоверно установлено здесь лишь в двух локальных пунктах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: U/Pb reoxpohoлогия; докембрий; неопротерозой; Енисейский кряж; гранитный магматизм

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 23-27-00204).

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Заангарская часть Енисейского кряжа представляет собой наиболее крупный выход докембрийских (преимущественно мезо- и неопротерозойских) пород в западном обрамлении Сибирской платформы. Обсуждаются две конкурирующие концепции генеральной тектоники этого региона. В.А. Верниковский и его коллеги предполагают, что преобладающая часть Заангарья за пределами амагматичной приплатформенной части представляет собой набор экзотических террейнов, столкнувшихся с Сибирским палеоконтинентом в неопротерозое [Vernikovsky et al., 2003, 2016]. По мнению этого коллектива, выходы домезопротерозойских пород в Заангарье отсутствуют.

Другая группа геологов, включающая авторов данной статьи, предполагает, что под всей территорией Заангарья распространен фундамент Сибирского кратона, переработанный в надсубдукционной, рифтогенной и коллизионной геодинамических обстановках в неопротерозое [Kuzmichev, Sklyarov, 2016]. К настоящему времени присутствие в Заангарье раннедокембрийских пород обосновано современными методами изотопного датирования лишь в двух локальных пунктах [Kuzmichev, Sklyarov, 2016; Kuznetsov et al., 2020]. Позиция данных пунктов такова, что эти датировки не могут быть достоверно проинтерполированы на значительные площади (рис. 1).

Тем не менее геологи Красноярской геолого-съемочной экспедиции (в настоящее время ассимилирована «Росгеологией») на геологических картах заангарской части Енисейского кряжа показали обширные выходы раннедокембрийских метаморфических пород, прорванных архейскими и палеопротерозойскими гранитоидами [Kachevsky et al., 1998; State Geological Мар..., 2005, 2010, 2018; и др.]. В качестве обоснования такой интерпретации приводятся общегеологические соображения и ссылки на Pb/U изотопные анализы M.И. Волобуева и его коллег [State Geological Map..., 2009; Kachevsky et al., 1994; и др.]. Для гранитоидов Заангарья M.И. Волобуевым получено много единичных датировок, но практически все они дискордантны, не образуют какой-либо согласованной системы и в настоящее время вряд ли заслуживают обсуждения. Среди этого набора сомнительных данных особое место занимают датировки Гаревского гранитного массива (рис. 1). По цирконам и ортитам этого массива выполнено наибольшее количество Pb/U изотопных анализов и палеопротерозойский возраст массива (1750 млн лет) рассматривается как геохронологический репер. М.И. Волобуев проводил массовое датирование уран-торийсодержащих минералов различных регионов Сибири в 60-х и 70-х гг. прошлого века [Volobuev et al., 1964a, 1964b, 1973, 1976; и др.]. По мере развития приборной базы и совершенствования методики изотопного анализа выяснилось, что значительная часть опубликованных им датировок не подтверждается современными методами изотопного датирования, что подорвало доверие ко всем результатам. На Енисейском кряже ситуация с данными М.И. Волобуева не столь драматична. Подтвержден палеопротерозойский возраст гранитоидов Таракского комплекса в Ангаро-Канской (южной) части кряжа [Nozhkin et al., 2003], по которому у М.И. Волобуева было ранее получено более 20 определений возраста по монацитам, ортитам и



**Рис. 1.** Схематическая геологическая карта Енисейского кряжа (по [State Geological Map..., 2005, 2010; Kachevsky et al., 1998; Storozhenko, Vasiliev, 2012], с упрощением).

Положение изображенной территории относительно Сибирской платформы показано на врезке. Прямоугольником обозначен Гаревский массив (соответствует контуру рис. 2).

Fig. 1. Schematic geological map of the Yenisei Ridge (after [State Geological Map..., 2005, 2010; Kachevsky et al., 1998; Storozhenko, Vasiliev, 2012], with simplification).

The position of the depicted territory relative to the Siberian Platform is shown in the inset. The Garevka pluton is indicated with a rectangle (corresponds to the outline of Fig. 2).

цирконам. Подтвердился также возраст нескольких неопротерозойских гранитных массивов Заангарья. Принципиально важным для понимания геологии и тектоники Заангарья явилось бы подтверждение палеопротерозойского возраста Гаревского гранитного массива. Такая попытка была предпринята В.А. Верниковским и его коллегами. Изотопный анализ цирконов, осуществленный в Институте геологии и геохроноло-





**Fig. 2.** Garevka granite pluton on geological maps scale 1:000000 (third generation), (after [State Geological Map..., 2005, 2010], with simplification.

гии докембрия РАН (ИГГД) в соответствии с современными стандартами, выявил неопротерозойский (752 ±3 млн лет) возраст гранитов [Vernikovsky et al., 2003; Vernikovskaya et al., 2006].

Однако оказалось, что вопрос о возрасте массива рано было считать окончательно закрытым. Эксперты по геологии Енисейского кряжа, изучавшие его десятилетиями, продолжали считать обе датировки - как неопротерозойскую, так и палеопротерозойскую - корректными. Согласно их интерпретации, неопротерозойский возраст имеют изотропные граниты западной части массива, в то время как восточная часть массива, сложенная, по их сведениям, гнейсовидными гранитами, имеет палеопротерозойский возраст (А.Д. Ножкин, А.А. Стороженко, Н.Ф. Васильев, устные сообщения). Такая компромиссная интерпретация, призванная «примирить» несовместимые данные, оказалась возможной с учетом того, что в опубликованных работах обеих групп исследователей [Volobuev et al., 1976; Vernikovsky et al., 2003; Vernikovskaya et al., 2006] отсутствуют сведения о том, где конкретно были отобраны проанализированные ими образцы. Проведенное нами расследование показало, что и в самом деле В.А. Верниковский отобрал продатированный им образец в западной части массива, а М.И. Волобуев в восточной.

При этом обнаружилась некоторая подмена понятий, связанная с названием массива. На геологических картах Енисейского кряжа, составленных в бывшей Красноярской геолого-съемочной экспедиции, собственно Гаревский гранитный плутон отнесен к глушихинскому лейкогранитному комплексу неопротерозоя (рис. 2). В качестве же палеопротерозойского гранитогнейсового комплекса, который также был назван «гаревским», показаны выходы гранитоидов, расположенные восточнее него. В.И. Лисицин, Н.И. Лисина и их коллеги, закартировавшие южную часть массива (южнее 60-й параллели; результаты геологической съемки масштаба 1:50000, 1983 г.), даже предлагали во избежание путаницы переименовать собственно Гаревский массив в Нижнегаревский. При этом для обоснования древнего возраста «гаревского гранитогнейсового ультраметаморфического комплекса» красноярские геологи ссылаются на анализы М.И. Волобуева, выполненные по собственно Гаревскому массиву глушихинского комплекса.

Ниже приводятся более детальные сведения об обеих конкурирующих датировках и рассказывается о попытке воспроизвести изотопно-геохронологические результаты М.И. Волобуева.

## 2. ДАННЫЕ В.А. ВЕРНИКОВСКОГО, А.В. ВЕРНИКОВСКОЙ И ИХ КОЛЛЕГ О ГАРЕВСКОМ МАССИВЕ

Согласно сведениям в работах [Datsenko, 1984; Vernikovsky et al., 2003; Vernikovskaya et al., 2006], Гаревский массив протягивается в субмеридиональном направлении на 30 км при ширине 5–7 км. Он сложен





среднезернистыми и порфировидными биотитовыми лейкогранитами с преобладанием (35-45 %) калиевого полевого шпата и незначительным (5-15 %) количеством плагиоклаза. Мусковит, хлорит и эпидот рассматриваются как продукты замещения биотита. Отмечено высокое содержание магнетита, присутствие акцессорного апатита, циркона, флюорита. Граниты характеризуются высоким содержанием SiO<sub>2</sub> (до 76 %), К<sub>2</sub>О (до 6.3 %) и редких щелочных элементов, повышенными концентрациями F, Th, Nb. Они слабоперглиноземистые: A/CNK=1.1-1.2 (mol %) и аномально железистые (FeOt/MgO - до 67). Все эти признаки считаются характерными для гранитов А-типа [Vernikovskaya et al., 2006]. В соответствии с концепцией тектонической эволюции Енисейского кряжа, разработанной этими геологами, предполагается, что внедрение гранитов Гаревского массива происходило в постколлизионной геодинамической обстановке. Граниты характеризуются слабоотрицательным єNd(t)=-1.9 и, по мнению авторов, были выплавлены из пород континентальной коры палеопротерозойского и мезопротерозойского - неопротерозойского возраста.

Образец для выделения циркона отобран на правом берегу р. Гаревка, вблизи западного контакта массива (В.А. Верниковский, личное сообщение) (рис. 3). Анализ проведен в Институте геологии и геохронологии докембрия РАН ID ТІМЅ-методом. Было проанализировано пять навесок циркона, три из которых подверглись аэроабразивной обработке. По трем анализам была построена дискордия с верхним пересечением 753±16 млн лет, СКВО=0.001 [Vernikovskaya et al., 2006] или 753±178 млн лет, СКВО=0.03 [Vernikovsky et al., 2003], хотя значения в таблице изотопных данных в обеих публикациях одни и те же. В качестве более точной оценки принято среднее значение возраста по <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb для трех анализов, объединенных дискордией, составившее 752±3 млн лет [Vernikovskaya et al., 2006]. Мы попытались воспроизвести эти оценки средствами Isoplot [Ludwig, 2003], используя таблицу изотопных данных в работах [Vernikovsky et al., 2003; Vernikovskaya et al., 2006], и получили несколько иные результаты (рис. 4). Использованные для этого построения значения приведены в табл. 1. Обращают на себя внимание крайне узкие интервалы ошибок. Первые три анализа аппроксимируются дискордией с верхним пересечением 750±4 млн лет, что аналогично

**Рис. 3.** Геологическая карта Гаревского гранитного массива. Карта построена по результатам геологических съемок масштаба 1:50000, выполненных А.А. Стороженко, В.К. Зуевым и др. (северная часть, завершена в 1981 г.) и В.И. Лисицыным, Н.И. Лисиной и др. (южная часть, 1983 г.), с изменениями). Незалитый белый круг на р. Гаревка – приблизительное положение образца гранита, датированного В.А. Верниковским и его коллегами.

Кружки с желтой заливкой – пункты опробования М.И. Волобуева, подписаны номера анализов (табл. 2). Кружок с белой заливкой на р. Верхняя Сурниха – наш образец (см. соответствующий раздел).

**Fig. 3.** Geologic map of the Garevka granite pluton. The map based on the geological surveys at a scale of 1:50000 (A.A. Storozhenko, V.K. Zuev et al. (northern part, completed in 1981); V.I. Lisitsyn, N.I. Lisina et al. (southern part, 1983)), with changes.

Unfilled white circle on the Garevka River is the approximate position of a granite sample dated by V.A. Vernikovsky and his colleagues. Circles with yellow filling are the sampling points of M.I. Volobuev, numbers of analyzes are signed (correspond to those in Table 2). A circle with a white fill on the Upper Surnikha River is our sample (see the relevant section).



**Рис. 4.** Pb/U изотопная диаграмма, построенная средствами Isoplot [Ludwig, 2003] для анализов цирконов Гаревского массива, приведенных в работе [Vernikovsky et al., 2003]. Подписаны параметры дискордии, объединяющей анализы 1–3. Номера анализов соответствуют таковым в табл. 1.

**Fig. 4.** Pb/U isotope diagram constructed using Isoplot [Ludwig, 2003] for analyses of the Garevka granite zircon given in [Vernikovsky et al., 2003]. The parameters of discordia, combining analyzes 1–3, are signed. Numbers of analyzes correspond to those in Table 1.

| Таблица 1. Pb/U изотопные отношения | (скорректированные на бланк и на об | быкновенный свинец | ), использованные для |
|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------|-----------------------|
| построения диаграммы на рис. 4*     |                                     |                    |                       |

Table 1. Pb/U isotope ratios (corrected for blank and common lead) used to construct the diagram in Fig. 4\*

| N⁰ | Фракция (мкм), А=%, удаленный<br>воздушной абразией | <sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U | ±2σ    | <sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U | ±2σ    | Rho  |
|----|---|-------------------------------------|--------|-------------------------------------|--------|------|
| 1  | -100+85   | 1.0742                              | 0.0021 | 0.1211                              | 0.0002 | 0.96 |
| 2  | –100+85, A 60 %                                     | 1.0824                              | 0.0022 | 0.1221                              | 0.0002 | 0.86 |
| 3  | –100+85, A 70 %                                     | 1.0687                              | 0.0021 | 0.1205                              | 0.0002 | 0.65 |
| 4  | -60+45  | 1.0763                              | 0.0022 | 0.1211                              | 0.0003 | 0.96 |
| 5  | -85+60, A 20 %                                      | 1.0843                              | 0.0022 | 0.1207                              | 0.0003 | 0.90 |

Примечание. \* – данные из [Vernikovsky et al., 2003].

Note. \* - extracted from [Vernikovsky et al., 2003].

первоначальной оценке с учетом ошибок, но с лучшими статистическими параметрами (рис. 4). Еще два дискордантных анализа лежат вне дискордии, как и в цитируемых статьях. При любом варианте расчета не возникает сомнений в корректности и достоверности полученного результата и в том, что возраст опробованных гранитов – середина неопротерозоя.

#### 3. ИЗОТОПНЫЕ ДАННЫЕ М.И. ВОЛОБУЕВА

М.И. Волобуев, С.И. Зыков и Н.И. Ступникова в 60– 70-х гг. прошлого века осуществляли массовое Pb-U-Th изотопное датирование цирконов и других гранитных акцессориев пород Енисейского кряжа. М.И. Волобуев (МГУ) обеспечивал геологическое сопровождение работ, последние два участника выполняли аналитическую часть исследования. В ранних работах коллектива можно найти сравнительно полные сведения о привязке образцов, качестве отсепарированных акцессориев, о методике исследования и др. Например, читатель с интересом узнает, что для выделения акцессорных минералов из мигматитов, вскрытых в приустьевой части р. Посольной, использовано 200 кг образцов [Volobuev et al., 1964b]. Очевидно, что доставка подобных проб с места полевых работ обременительна, и авторы признаются, что для некоторых проб Каламинского гранитного массива циркон отмывался из аллювия в верховьях ручья, бассейн которого целиком лежит в пределах массива. Вероятно, опробование аллювия являлось распространенной практикой, что следует иметь в виду при обсуждении возраста некоторых образцов. В статье [Volobuev et al., 1964a] сообщается, что ошибки в определении концентраций <sup>206</sup>Pb, <sup>207</sup>Pb и <sup>208</sup>Pb не превышали 0.5 %, а для <sup>204</sup>Pb – 3 %. Это единственный случай, когда упоминание об ана-

| Номер<br>анализа | Номер<br>образца | U%    | Th%   | Pb%    | <sup>204</sup> Pb%** | <sup>206</sup> Pb%** | <sup>207</sup> Pb%** | <sup>208</sup> Pb%** | <sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U* | ±1σ(%) | <sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U* | ±1σ(%) | Rho |
|------------------|------------------|-------|-------|--------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------------------------|--------|--------------------------------------|--------|-----|
| 823              | 28/64            | 0.015 | 0.76  | 0.0352 | 0.17                 | 07.53                | 3.15                 | 89.11                | 2.095                                | 1      | 0.1336                               | 1      | 0.7 |
| 824              | 150-1            | 0.073 | 0.055 | 0.0350 | 0.34                 | 59.30                | 10.89                | 29.47                | 4.3764                               | 2      | 0.3002                               | 2      | 0.7 |
| 825              | 150-1            | 0.052 | 0.045 | 0.0105 | 0.15                 | 71.83                | 7.72                 | 20.23                | 1.755                                | 1      | 0.1627                               | 1      | 0.7 |
| 826              | 26/65            | 0.010 | 0.56  | 0.0349 | 0.486                | 12.12                | 7.94                 | 79.35                | 2.9511                               | 2.5    | 0.1837                               | 2.5    | 0.7 |
| 827              | 31/65            | 0.02  | 0.74  | 0.0328 | 0.251                | 11.07                | 4.59                 | 84.09                | 2.000                                | 1.5    | 0.1358                               | 1.5    | 0.7 |
| 828              | 500/67           | 0.10  | 0.048 | 0.0257 | 0.742                | 47.549               | 15.080               | 36.629               | 1.5479                               | 3      | 0.1071                               | 3      | 0.7 |
| 829              | 020              | 0.019 | 1.02  | 0.0450 | 0.165                | 08.34                | 3.13                 | 88.36                | 2.3267                               | 1      | 0.1582                               | 1      | 0.7 |
| 831              | 069              | 0.079 | 0.046 | 0.0111 | 0.047                | 70.983               | 8.305                | 20.665               | 1.706                                | 1      | 0.1145                               | 1      | 0.7 |
| 866              | 28/65            | 0.090 | 0.056 | 0.0168 | 0.41                 | 64.36                | 10.11                | 25.12                | 1.153                                | 2      | 0.125                                | 2      | 0.7 |
| 25/64            | 25/64            | 0.069 | -     | 0.0364 | 0.285                | 59.412               | 11.023               | -                    | 5.635                                | 1.5    | 0.3362                               | 1.5    | 0.7 |

| Таблица 2. U-Th-Pb аналитические данные М.И. Волобуева по Гаревскому гранитному мас    | ссиву |
|--|-------|
| <b>Table 2.</b> U-Th-Pb analytical data by M.I. Volobuey on the Gareyka granite pluton |       |

Примечание. \*- введена коррекция на обыкновенный свинец следующего изотопного состава: <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb=15.65, <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb=15.25, <sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb= = 34.91. \*\* – доля изотопа в валовом составе свинца.

823: ортит, среднезернистый гранит Гаревского массива, р. Гаревка, 1.5 км ниже астропункта. 824: циркон, фракция >0.1 мм, аллювий гранитов Гаревского массива, р. Гаревка, устье правого притока 1.5 км ниже астропункта. 825: циркон, фракция <0.1 мм, аллювий гранитов Гаревского массива, р. Гаревка, устье правого притока 1.5 км ниже астропункта. 826: ортит, гранит Гаревского массива, Левая Верхняя Сурниха, среднее течение. 827: ортит, оттуда же. 828: циркон, среднезернистый биотитовый гранит Гаревского массива, р. Гаревка в районе порога. 829: ортит, красный порфиробластовый гранит, верховье Правой Верхней Сурнихи. 831: циркон, гранит Гаревского массива. Левая Верхняя Сурниха, 10 км от устья. 866: циркон, гранит Гаревского массива, Левая Верхняя Сурниха. 25/64: циркон, гранит, р. Гаревка, 5 км ниже устья р. Полой.

Note. \*- a correction has been introduced for ordinary lead of the following isotopic composition: <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb=15.65, <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb=15.25, <sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb=34.91. \*\* - the share of the isotope in the total composition of lead.

823: orthite, medium-grained granite of the Garevka pluton, Garevka River, 1.5 km below the astro-point. 824: zircon, fraction >0.1 mm, alluvium of granites of the Garevka pluton, Garevka River, the mouth of the right tributary is 1.5 km below the astro-point. 825: zircon, fraction <0.1 mm, alluvium of granites of the Garevka pluton, Garevka River, mouth of the right tributary, 1.5 km below the astro-point. 826: orthite; granite of the Garevka pluton, Left Upper Surnikha River, middle course. 827: ortit, from there. 828: zircon, medium-grained biotite granite of the Garevka pluton, Garevka River in the area of the threshold. 829: orthite, red porphyroblastic granite, upper reaches of the Right Upper Surnikha River. 831: zircon, granite of the Garevka massif. Left Upper Surnikha River, 10 km from the mouth. 866: zircon, granite of the Garevka massif, Left Upper Surnikha River. 25/64: zircon, granite, Garevka river, 5 km below the mouth of the Polaya River.

литических ошибках встретилось в публикациях этих авторов. В более поздних публикациях фактические сведения становятся скудными, и часто непонятно, что конкретно было опробовано и проанализировано авторами. Во многих статьях отсутствуют таблицы аналитических данных, сообщаются только голословные выводы о возрасте, что явилось одной из причин недоверия геологов к результатам М.И. Волобуева. Другой причиной являются аналитические проблемы. Валовые концентрации урана, тория и свинца определялись разными методами на разных приборах. Фактически только изотопный состав свинца анализировался масс-спектрометрическим методом, из чего следует, что наиболее корректным является возраст, вычисленный по отношению <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb. Аналитические ошибки не сообщаются. Часто анализировались откровенно «грязные» образцы, что видно по чрезвычайно высокой концентрации <sup>204</sup>Pb в некоторых анализах (см. ниже). Безусловно, все без исключения выводы о возрасте, полученные указанной группой исследователей, требуют заверки с использованием современных методов изотопного анализа.

Наиболее полная таблица результатов изотопного анализа цирконов, ортитов, апатитов и монацитов, выделенных из пород Енисейского кряжа, приведена в неопубликованном отчете С.Д. Сидораса, М.И. Волобуева по производству радиологических и палеомагнитных работ по определению абсолютного возраста геологических формаций различных регионов Сибири (1983 г.). В приложении к отчету приведена таблица Pb-U-Th аналитических данных для 103 образцов урани торийсодержащих минералов Енисейского кряжа. В соответствии со стандартами 50-летней давности, аналитическая информация включает валовое процентное содержание урана, тория и свинца и изотопный состав свинца без указания ошибок.

Критический параметр, который сразу бросается в глаза в таблице, – высокие концентрации <sup>204</sup>Pb, которые в некоторых образцах превышают 1 % и часто – 0.5 %. Этот изотоп свинца нерадиогенный, и его абсолютное количество в составе Земли не изменилось на протяжении ее геологической истории. С учетом того, что в усредненном составе современного обыкновенного свинца концентрация <sup>204</sup>Pb составляет 1.37 % [Stacey, Kramers, 1975], оказывается, что в некоторых образцах циркона М.И. Волобуева 1/3, 1/2, и даже иногда 2/3 проанализированного свинца являются нерадиогенными, что сейчас выглядит совершенно нереальным. В геохронологии количество измеренного <sup>204</sup>Pb используется для расчета поправки на обыкновенный свинец, что необходимо для корректного определения изотопных отношений радиогенного свинца к материнским урану и торию. Предполагается, что обыкновенный свинец оказался в анализируемом минерале в момент кристаллизации (в виде минеральных включений) и для введения коррекции применима модель двухэтапной эволюции изотопного состава земного свинца [Stacey, Kramers, 1975]. В современной практике изотопного анализа значение такой поправки обычно крайне невелико, и данный подход работает вполне корректно, даже если расчетное соотношение изотопов свинца несколько отличалось от реального. При высокой концентрации обыкновенного свинца величина поправки, вводимой в измеренные изотопные отношения, существенно возрастает, и итоговые изотопные отношения и соответствующие им возрасты становятся весьма чувствительны к выбранной изотопной композиции. М.И. Волобуев и его коллеги использовали для коррекции реальный изотопный состав свинца докембрийских галенитов и микроклинов Енисейского кряжа. Для пород разного возраста применялись различные варианты такого состава, и мы считаем такой подход в данном случае более оправданным.

В указанном отчете С.Д. Сидораса и М.И. Волобуева найдено десять анализов ортитов и цирконов, выделенных из гранитов собственно Гаревского массива (табл. 2). В отчете приведены также привязки образцов, что позволяет вынести пункты их отбора на карту (см. рис. 3). На этом рисунке видно, что под Гаревским гранитным массивом М.И. Волобуев имел в виду обособленное картируемое геологическое тело, которое на современных картах отнесено к неопротерозойскому глушихинскому комплексу. В 80-х гг. прошлого века первый автор рассчитал для указанных анализов несколько вариантов изотопных отношений <sup>207</sup>Pb/<sup>235</sup>U и <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U, скорректированных на обыкновенный свинец, используя для введения поправки разные составы обыкновенного свинца, предложенные в упомянутом отчете [Kuzmichev, 1987]. Наилучшие результаты показал следующий состав: <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb=15.65, <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb= =15.25, <sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb=34.91. Такая композиция определена для микроклина пегматоидного гранита Таракского массива, отобранного на р. Кан в районе Комаровского порога [Volobuev et al., 1964b]. В цитируемой работе М.И. Волобуев и его коллеги предлагали использовать такой состав для введения поправки в анализы палеопротерозойских пород Енисейского кряжа. Мы считаем корректным его использование и для потенциально более молодых гранитов Енисейского кряжа, учитывая большую вероятность того, что они выплавлялись из раннедокембрийских коровых пород. Эти расчеты, произведенные 40 лет назад, можно было бы обновить с использованием современных программ, но перед нами не стоит задача максимально точно и полно обсчитать анализы М.И. Волобуева. Все, что нужно выяснить, заслуживают ли эти данные усилий по их верификации.

В современных реалиях результаты расчетов могут быть визуализированы на изотопной диаграмме, построенной средствами Isoplot [Ludwig, 2003]. Для построения пришлось ввести ошибки измерений изотопных отношений, истинное значение которых неизвестно. Ошибки распределены пропорционально концентрации <sup>204</sup>Pb: от 1 % (1 сигма) для образцов с низкой концентрацией и до 3 % для таковых с высокой концентрацией. Указанные величины отражают не столько аналитические ошибки, сколько степень неопределенности в оценке истинного состава обыкновенного свинца и, соответственно, степень неопределенности истинных отношений изотопов радиогенного свинца к соответствующим материнским изотопам. Для всех образцов принят условный коэффициент корреляции ошибок, равный 0.7.

Несмотря на множество грубых допущений, мы получили осмысленный результат (рис. 5). На рисунке видно, что единственный анализ, без которого почти все остальные теряют смысл, - это конкордантный анализ циркона образца 150-1 (анализ № 824, класс >100 мкм), возраст которого по <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb составляет ~1730 млн лет. Изотопные отношения в цирконах этого же образца, но меньшего размерного класса (<100 мкм, № 825) оказались дискордантными. Это единственный случай, когда М.И. Волобуев проанализировал навески цирконов разного размера одного и того же образца, что соответствует современной практике, принятой в TIMS методе. Оба анализа могут быть объединены двухточечной дискордией с пересечениями 823±53 и 1747 ±110 млн лет, 2σ (рис. 5). В обычной практике результаты TIMS анализов группируются вблизи верхнего пересечения с конкордией, на рис. 5 они разнесены более чем на 900 млн лет. Возраст верхнего пересечения аналогичен тому, что определял для Гаревского массива сам М.И. Волобуев [Volobuev et al., 1976], нижнее пересечение близко к датировке В.А. Верниковского с соавторами [Vernikovsky et al., 2003]. Теоретически можно предположить, что крупные цирконы отвечают этапу кристаллизации первоначальной гранитной магмы, а мелкие являются новообразованными и характеризуют наложенный этап метаморфизма и частичного переплавления древних гранитов. Очевидно, что практически такое строго бимодальное распределение кристаллов с границей в 100 мкм вряд ли может быть реализовано в процессе частичного переплавления породы. Вблизи нижнего пересечения располагается еще один субконкордантный анализ циркона из этого массива, отобранный на р. Левая Верхняя Сурниха, № 866 (см. рис. 3; рис. 5). Возраст этого образца циркона по  $^{206} Pb/^{238} U$  составляет  ${\sim}755$  млн лет, что с учетом ошибок совпадает с оценкой возраста Гаревского гранита В.А. Верниковского (см. выше) и с нашей оценкой (см. ниже).

Остальные шесть анализов дискордантны, но четыре из них лежат на прямой и могут быть объединены дискордией с референсным анализом № 824. Параметры этой пятиточечной дискордии следующие: нижнее пересечение –38±66, верхнее пересечение 1726 ±43 млн лет, СКВО=0.63 (рис. 5), т.е., дискордия направлена в начало координат, что является наиболее



**Рис. 5.** Pb/U изотопная диаграмма для анализов Гаревского гранитного массива М.И. Волобуева и его коллег (табл. 2). Разным цветом показаны два варианта проведения дискордий и подписаны их параметры. Два красных овала, очерченных толстыми линиями, – разные размерные фракции циркона одного образца. Серые овалы – дискордантные анализы, не участвующие в расчетах. Оранжевый овал – субконкордантный анализ, предположительно отвечающий истинному возрасту Гаревского гранита. Местоположение проанализированных образцов показано на рис. 3.

Fig. 5. Pb/U isotope diagram for analyses by M.I. Volobuev and his colleagues (Table 2).

Different colors show two options for conducting discordias and their parameters are signed in the same colour. Gray ovals are discordant analyzes not included in the calculations. Two thick red ovals are different size fractions of the same zircon sample. The orange oval is a subconcordant analysis, supposedly corresponding to the true age of the Garevka granite. The location of samples is shown in Fig. 3.

частым случаем и интерпретируется как потеря радиогенного свинца на современном этапе. Изотопные отношения <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb (и соответствующий им возраст) у таких анализов совпадают. Смущает то, что опять четыре анализа, которые мы подвесили на дискордию к референсному анализу № 824, группируются не у верхнего пересечения, а вблизи неопротерозойской части конкордии. Изотопный состав, отвечающий их положению на графике, может быть получен путем добавки обыкновенного свинца к неопротерозойским конкордантным анализам. Такой вариант возможен при анализе грязных проб, в которых перемешан обыкновенный свинец разного состава, не совпадающего с тем, который был использован для введения поправки. Есть еще один дискордантный анализ циркона из Гаревского плутона (№ 25/64), возраст которого по <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb около 2200 млн лет, а по <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U ~1850 млн лет. Он расположен за пределами диаграммы на рис. 5 и не вписывается в систему с другими образцами.

Таким образом, возможный палеопротерозойский возраст Гаревского гранитного массива представляется правдоподобным, так как подтвержден шестью изотопными анализами, образующими некую объяснимую систему. Следует, однако, иметь в виду, что все дискордантные анализы «подвешены» на анализ № 824 образца 150-1. Изъятие этого анализа из изотопной си-

https://www.gt-crust.ru

стемы превращает ее всю в бессмысленный набор дискордантных значений. Соответственно, для решения вопроса о возможном присутствии палеопротерозойских доменов в составе неопротерозойского Гаревского гранитного массива следует попытаться воспроизвести данные, полученные для образца 150-1, используя современные методы изотопной геохронологии. Этот образец снабжен конкретной привязкой (см. примечание к табл. 2), и именно из этой же точки следовало отобрать дополнительный материал для изотопного анализа циркона.

## 4. НАШИ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

Река Гаревка прорезает поперек весь одноименный гранитный массив, но по ее берегам скальные выходы отсутствуют (рис. 6, а). Граниты эпизодически обнажены на склонах в виде курума (рис. 6, б), который частично подмыт рекой. Только в районе т. 096 (рис. 7) торчащие из воды обмытые глыбы среднезернистого гранита все еще находятся в коренном залегании. В этом месте на реке самый выраженный порог. Массив сложен биотитовыми лейкогранитами, преимущественно среднезернистыми, почти не несущими признаков рассланцевания. В восточной трети появляются более крупнозернистые граниты аналогичного состава



#### Рис. 6. Полевые фотографии.

(*a*) – р. Гаревка, пересекающая одноименный гранитный массив (район т. 098, рис. 7). (*б*) – гранитный курум в районе т. 093 (рис. 7). (*в*) – точка 094. Здесь находится устье ручья, где М.И. Волобуев отбирал пробу 150-1, по которой сделан референсный анализ № 824. Ручей выносит остроугольные обломки свежего гранита. (*г*) – приустьевая часть ручья 094, вскрывающая однородный близкоренной курум гранита. (*д*) – р. Верхняя Сурниха, вскрывающая северное окончание Гаревского массива. На фото – курум гранитов в т. 287 (см. рис. 3). (*е*) – сложнодеформированные метаморфизованные породы с жилками гранитной лейкосомы в т. 101 (рис. 7).

## Fig. 6. Field photos.

(*a*) – the Garevka River crosses the granite massif (view at point 098, Fig. 7). (*b*) – granite stone run at point 093 (Fig. 7). (*b*) – view on point 094. Here is the mouth of the brook, where M.I. Volobuev took sample 150-1 that yielded reference analysis N<sup>o</sup> 824. The brook carries out fragments of fresh granite. (*b*) – lover part of brook 094, which exposes blocks of granite. (*b*) – the Upper Surnikha River cuts through the northern end of the Garevka massif. The granite stone run in point 287 (see Fig. 3). (*b*) – complicated deformation of metamorphosed rocks with granitic veins in point 101 (Fig. 7).

со слабовыраженной порфировидностью за счет выделений калиевого полевого шпата, участками слабо рассланцованные (биотитовые пластины ориентированы в одной плоскости). В гранитах восточной части массива, кроме биотита, иногда содержится амфибол. Типичным для всех разновидностей является присутствие акцессорного фиолетового флюорита, который можно разглядеть в лупу практически в каждом образце. В некоторых разностях также видны чешуйки мусковита, встречается различимый магнетит, иногда заметен турмалин. Именно присутствие флюорита в гранитах вдоль всего пересечения массива свидетельствует о его геохимической однородности на широте р. Гаревка и о малой вероятности того, что его западная и восточная часть сложены разновозрастными породами.

Нас несколько смущало то обстоятельство, что образец 150-1 М.И. Волобуева, результаты анализа которого мы намеревались воспроизвести, отобран из аллювия, о чем честно сообщается в уже цитировавшемся отчете С.Д. Сидораса и М.И. Волобуева (см. примечание к табл. 2). На месте выяснилось, что устье ручья, где был отобран образец, завалено свежими остроугольными обломками красных гранитов однородного состава, вынесенных этим ручьем (см. рис. 6, в). В приустьевой части ручей размывает курум этих гранитов и не столько переносит глыбы, сколько обнажает их из-под наносов (см. рис. 6, г), чужеродные обломки среди них отсутствуют. Уже в 200 м от устья ручей течет по плоской заболоченной низине и никаких обломков в аллювии не содержит. Из близкоренных глыб приустьевой части ручья отобран образец 094/1-05 (рис. 7, точка 094). Учитывая то, что референсная датировка Волобуева получена из фракции, предположительно содержащей древний реликтовый циркон, мы дополнительно отобрали еще два образца – 096/1 и 098/2 – в

восточной и центральной части массива соответственно (рис. 7, точки 096 и 098). Этим авторы хотели диверсифицировать опробованные разновидности, чтобы повысить шансы обнаружения цирконов с древними ядрами. В районе точки 098 как раз был отобран упоминавшийся выше образец М.И. Волобуева № 25/64 с древним дискордантным возрастом.

Дополнительно опробовано северное окончание Гаревского массива на р. Верхняя Сурниха (см. рис. 3). Здесь, пересекая гранитный массив, река образует крутой порог. Ниже порога река заворачивает вдоль контакта и вскрывает на значительном протяжении краевую зону желто-бурого мелко- и среднезернистого слабосланцеванного биотитового гранита. Основная часть массива обнажена в виде крупноглыбового курума, который тянется до водораздела (см. рис. 6, д). Граниты отличаются от описанных выше тем, что среди них преобладают порфировидные разности с выделениями калиевого полевого шпата (до 1.5 см) и местами – кварца (до 1 см). Так же, как на р. Гаревка, присутствуют и равномерно-среднезернистые граниты. Гнейсовидность (сланцеватость) проявлена слабо и неравномерно; в некоторых участках макроскопически она не опознается. Единственный темноцветный минерал представлен биотитом. В некоторых разностях также присутствует мелкочешуйчатый мусковит. Граниты здесь намного беднее типоморфным для комплекса флюоритом, чем в пересечении вдоль р. Гаревка. В поле флюорит не наблюдался и был обнаружен лишь в протолочках.

Во всех четырех продатированных образцах гранита кристаллы циркона хорошо оформлены и характеризуются однотипной морфологией, выделить визуально различимые популяции не удается (рис. 8). На рис. 8 приведены примеры наиболее чистых кристаллов, отобранных для изотопного анализа. Видно, что даже они



**Рис. 7.** Пересечение Гаревского гранитного массива р. Гаревка. Пункты отбора датированных образцов выделены кружками с белой заливкой. Устье ручья 094 – референсный пункт, из которого происходит единственный конкордантный палеопротерозойский анализ М.И. Волобуева.

**Fig. 7.** Garevka River cuts the same-name pluton. Points of the dated samples are marked with circles with white fill. The mouth of the 094 brook is the reference point where M.I. Volobuev has taken granite sample that yielded the concordant Paleoproterozoic analysis.

оказались грязными, трещиноватыми, с включениями апатита и сульфидов. Кристаллов ювелирного качества нет ни в одном размерном классе. Такой материал представляет собой проблему для датирования TIMS техникой: набрать необходимую навеску условно пригодных кристаллов трудно. На CL (катодолюминесцентных) изображениях видно, что кристаллизация цирконов осуществлялась неравномерно, сопровождаясь этапами растворения с образованием округлых зерен и последующего их обрастания кристаллографичными слоями. В нескольких случаях такая структура напоминает ядро и оболочку. Для двух кристаллов потенциальные ядра были проанализированы (рис. 8, б, д), но разница в возрасте не выявлена. В нескольких зернах (не показаны на рис. 8) в катодных лучах намечались ядра, структура которых казалась дискордантной зонам роста внешней части кристалла. Из-за ограниченных ресурсов они не были продатированы в свое время. Позднее, когда авторы собрались сделать дополнительные анализы, выяснилось, что шайба утеряна.

Циркон анализировался в Центре изотопных исследований ВСЕГЕИ на масс-спектрометре SHRIMP-II (табл. 3) в соответствии с методиками, изложенными в работе [Williams, 1997]. Поток первичных ионов кислорода интенсивностью ~3.5 nA был сфокусирован на пятне 25×35 мкм. Измеренные изотопные отношения корректировались с использованием цирконового стандарта Temora-2 [Black et al., 2004], концентрации U и Th рассчитаны на основе анализов стандарта 91500 [Wiedenbeck et al., 1995]. Результаты усреднялись по четырем циклам сканирования. Редукция данных проводилась посредством программы Squid [Ludwig, 2001].

По реперному образцу 094/1-05 выполнено шесть анализов (табл. 3; рис. 9, красные овалы). Интервалы ошибок оказались в 20 раз выше таковых в анализах [Vernikovsky et al., 2003] (см. табл. 1). Конкордантный возраст для этого образца составил 756±10 млн лет. Еще семь анализов выполнено по остальным трем образцам (по 2–3 анализа на образец). По каждому образцу на шайбу было выложено достаточное количество кристаллов для полноценного датирования, но поскольку все они легли в единый кластер, было решено ограничиться уже проанализированными зернами. Конкордантный возраст объединенного кластера, включающего все 13 анализов, составил 762±7 млн лет



### Рис. 8. Примеры кристаллов циркона из разных проб Гаревского гранита.

На каждый кристалл представлено по три изображения, позволяющих получить полное представление об их качестве, включениях и внутренней структуре (слева направо): 1) оптическое в проходящем свете, 2) в обратнорассеянных электронах и 3) люминесценция в катодных лучах. На CL изображениях – овалы проанализированных участков кристалла и их номера, соответствующие табл. 3. Верхний ряд (*a*-*e*) – обр. 094/1-05; нижний ряд: (*z*) – обр. 096/1-05; (*d*) – обр. 098/2-05; (*e*) – обр. 287/1-05.

Fig. 8. Examples of zircon crystals from different samples of Garevka granite.

Three images are presented for each crystal, allowing to get a complete impression of their quality and internal structure (from left to right): 1) optical in transmitted light, 2) in back-scattered electrons and 3) luminescence in cathode rays (CL). Analyzed spots are shown on the CL images, their numbers corresponding to Table 3 are signed. The upper row (*a–e*) is the sample 094/1-05; bottom row: (*z*) – sample 096/1-05; (*d*) – 098/2-05; (*e*) – 287/1-05.

| Номер<br>анализа | Общ.<br><sup>206</sup> Pb (%) | U,<br>ppm | Th,<br>ppm | <sup>232</sup> Th/<br><sup>238</sup> U | ppm<br><sup>206</sup> Pb* | ()<br><sup>206</sup> Pb<br>aş | 1)<br>/ <sup>238</sup> U<br>ge | (1<br><sup>207</sup> Pb)<br>ag | 1)<br>/ <sup>206</sup> Pb<br>ge | D % | Сумм.<br><sup>238</sup> U/ <sup>206</sup> Pb | ±%  | Сумм.<br><sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb | ±%   | (1)<br><sup>238</sup> U/ <sup>206</sup> Pb* | ±%  | (1)<br><sup>207</sup> Pb*/ <sup>206</sup> Pb* | ±%   | (1)<br><sup>207</sup> Pb*/ <sup>235</sup> U | ±%  | (1)<br><sup>206</sup> Pb*/ <sup>238</sup> U | ±%  | Rho  |
|------------------|-------------------------------|-----------|------------|--|---------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-----|--|-----|---|------|---|-----|---|------|---|-----|---|-----|------|
| 287/1-05.1.1     | 0.69                          | 366       | 129        | 0.37                                   | 40.6                      | 776                           | ±14                            | 746                            | ±75                             | -4  | 7.76   | 1.9 | 0.0699  | 1.5  | 7.81  | 1.9 | 0.06410                                       | 3.5  | 1.132                                       | 4.0 | 0.1280                                      | 1.9 | .479 |
| 287/1-05.2.1     | 0.55                          | 495       | 263        | 0.55                                   | 52.2                      | 742                           | ±13                            | 713                            | ±78                             | -4  | 8.15   | 1.9 | 0.0677  | 2.8  | 8.19  | 1.9 | 0.06310                                       | 3.7  | 1.063                                       | 4.1 | 0.1221                                      | 1.9 | .459 |
| 094/1-05.1.1     | 0.19                          | 763       | 242        | 0.33                                   | 80.1                      | 742                           | ±13                            | 768                            | ±31                             | 3   | 8.18   | 1.9 | 0.06638                                       | 1.1  | 8.20  | 1.9 | 0.06479                                       | 1.5  | 1.089                                       | 2.4 | 0.1219                                      | 1.9 | .781 |
| 094/1-05.2.1     | 0.23                          | 640       | 250        | 0.40                                   | 70.2                      | 773                           | ±14                            | 749                            | ±36                             | -3  | 7.83   | 1.9 | 0.06612                                       | 1.2  | 7.85  | 1.9 | 0.06420                                       | 1.7  | 1.128                                       | 2.5 | 0.1274                                      | 1.9 | .740 |
| 094/1-05.3.1     | 0.25                          | 455       | 245        | 0.56                                   | 48.3                      | 749                           | ±13                            | 746                            | ±51                             | 0   | 8.09   | 1.9 | 0.06617                                       | 1.4  | 8.11  | 1.9 | 0.06410                                       | 2.4  | 1.090                                       | 3.1 | 0.1233                                      | 1.9 | .621 |
| 094/1-05.3.2     | 0.22                          | 704       | 278        | 0.41                                   | 75.8                      | 759                           | ±13                            | 746                            | ±34                             | -2  | 7.98   | 1.9 | 0.06591                                       | 1.1  | 8.00  | 1.9 | 0.06410                                       | 1.6  | 1.105                                       | 2.5 | 0.1250                                      | 1.9 | .758 |
| 094/1-05.4.1     | 0.20                          | 780       | 246        | 0.33                                   | 83.3                      | 754                           | ±13                            | 757                            | ±32                             | 0   | 8.04   | 1.9 | 0.06609                                       | 1.1  | 8.06  | 1.9 | 0.06446                                       | 1.5  | 1.103                                       | 2.4 | 0.1241                                      | 1.9 | .778 |
| 094/1-05.5.1     | 0.02                          | 1111      | 576        | 0.54                                   | 119                       | 759                           | ±13                            | 764                            | ±20                             | 1   | 8.00   | 1.9 | 0.06485                                       | 0.92 | 8.00  | 1.9 | 0.06467                                       | 0.96 | 1.115                                       | 2.1 | 0.1250                                      | 1.9 | .887 |
| 096/1-05.1.1     | 0.00                          | 1145      | 462        | 0.42                                   | 124                       | 763                           | ±13                            | 748                            | ±20                             | -2  | 7.96   | 1.8 | 0.06419                                       | 0.94 | 7.96  | 1.8 | 0.06419                                       | 0.94 | 1.112                                       | 2.1 | 0.1256                                      | 1.8 | .891 |
| 096/1-05.2.1     | 0.06                          | 710       | 285        | 0.42                                   | 78.7                      | 782                           | ±14                            | 768                            | ±27                             | -2  | 7.75   | 1.9 | 0.06527                                       | 1.2  | 7.76  | 1.9 | 0.06480                                       | 1.3  | 1.152                                       | 2.3 | 0.1289                                      | 1.9 | .826 |
| 096/1-05.2.2     | 0.00                          | 822       | 379        | 0.48                                   | 92.2                      | 792                           | ±14                            | 781                            | ±24                             | -1  | 7.65   | 1.9 | 0.06521                                       | 1.1  | 7.65  | 1.9 | 0.06521                                       | 1.1  | 1.175                                       | 2.2 | 0.1306                                      | 1.9 | .859 |
| 098/2-05.1.1     | 0.00                          | 930       | 381        | 0.42                                   | 100                       | 763                           | ±13                            | 798                            | ±34                             | 5   | 7.96   | 1.8 | 0.0657  | 1.6  | 7.96  | 1.8 | 0.06570                                       | 1.6  | 1.138                                       | 2.4 | 0.1256                                      | 1.8 | .754 |
| 098/2-05.2.1     | 0.30                          | 307       | 257        | 0.87                                   | 33.4                      | 766                           | ±14                            | 723                            | ±61                             | -6  | 7.90   | 1.9 | 0.0659  | 1.7  | 7.92  | 2   | 0.06340                                       | 2.9  | 1.104                                       | 3.5 | 0.1262                                      | 2.0 | .564 |

**Таблица 3.** Результаты изотопного анализа цирконов Гаревского массива (рис. 9) **Table 3.** Results of isotope analysis of zircons from the Garevka pluton (Fig. 9)

Примечание. Ошибки даны с доверительными интервалами 1σ; Pb\* = радиогенный Pb. (1) – введена коррекция на обыкновенный свинец на основании измеренного количества <sup>204</sup>Pb. Географические координаты пунктов отбора образцов:

094/1-05 – 59°57.724' с.ш., 91°4.523' в.д.;

096/1-05 - 59°57.416' с.ш., 91°5.048' в.д.;

098/2-05 - 59°57.734' с.ш., 91°3.290' в.д.;

287/1-05 – 60°10.822' с.ш., 90°55.338' в.д.

Note. Errors are given with confidence intervals of 1 $\sigma$ ; Pb\* = radiogenic Pb. (1) – correction for common lead has been introduced based on the measured amount of <sup>204</sup>Pb.

Geographic coordinates of sampling points:

094/1-05 – 59°57.724' N, 91°4.523' E;

096/1-05 - 59°57.416' N, 91°5.048' E;

098/2-05 - 59°57.734' N, 91°3.290' E; 287/1-05 - 60°10.822' N, 90°55.338' E.



**Рис. 9.** Сводная изотопная диаграмма, включающая все анализы, выполненные по четырем образцам (овалы разного цвета) Гаревского гранита.

Fig. 9. Isotope diagram, including all analyzes performed on four zircon samples (ovals of different colors) of Garevka granite.

(рис. 9), что, с учетом ошибок, почти совпадает с результатами В.А. Верниковского и его коллег.

Гаревский гранитный плутон представляет собой обособленное однородное магматическое тело, в качестве которого и был закартирован. Никаких признаков замещения и переработки in situ древнего субстрата не обнаружено: плутон кристаллизовался из относительно гомогенной гранитной магмы, перемещенной из более глубоких уровней коры. Эти геологические наблюдения и результаты проведенного геохронологического исследования навсегда закрывают вопрос о возможном палеопротерозойском возрасте какой-либо части Гаревского гранитного массива.

## 5. ПРИМЕНИМОСТЬ ИЗОТОПНЫХ ДАННЫХ М.И. ВОЛОБУЕВА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ ЕНИСЕЙСКОГО КРЯЖА

Из всего наследия М.И. Волобуева, С.И. Зыкова и Н.И. Ступниковой практическая ценность может обсуждаться только для таблицы аналитических данных, помещенных в упоминавшемся выше отчете С.Д. Сидораса и М.И. Волобуева. Дополнительная информация, такая как геологические сведения об опробованных объектах или пояснения к анализам, в публикациях крайне скудна, поверхностна или отсутствует. В 60– 70-х гг. прошлого века анализы, выполненные М.И. Волобуевым и его коллегами, были единственным источником геохронологических данных о возрасте докембрийских магматических комплексов Енисейского кряжа, если не принимать в расчет К-Аг датировки. Первый автор (А.Б. Кузьмичев) в свое время потратил много усилий на то, чтобы разобраться в их пригодности, пересчитывая изотопные данные для ортитов и цирконов магматических пород западной части Заангарья, помещенные в приложении к упомянутому отчету. В большинстве случаев это разрозненные дискордантные анализы для разных объектов, которые М.И. Волобуев искусственным образом объединял в разных сочетаниях дискордиями. Среди донеопротерозойских датировок гранитоидов Заангарья только для Гаревского плутона был получен набор данных, заслуживающих обсуждения и проверки. После того как анализ № 824, определяющий для всей коллекции, оказался артефактом, для которого отсутствует рациональное объяснение, и этот последний массив данных потерял смысл. Некоторые неопротерозойские датировки М.И. Волобуева для гранитоидов Заангарья могут оказаться корректными, и пример тому – в субконкордантном анализе циркона № 866 (см. табл. 2; см. рис. 3, 5), возраст которого по <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U аналогичен датировкам В.А. Верниковского с коллегами и авторов данной статьи. Но неопротерозойские граниты и без М.И. Волобуева достаточно полно охарактеризованы современными изотопными анализами.

Низкое качество анализов нельзя объяснить несовершенством аппаратуры, которая при грамотном подходе позволяла получать корректные данные, пусть и с большими ошибками. Настораживает то, что, судя по тону публикаций, сам М.И. Волобуев был вполне удовлетворен результатами выполненных анализов, не стремился обсудить их неоднозначную интерпретацию и не видел необходимости модифицировать и улучшать процедуры пробоотбора, пробоподготовки и изотопного анализа. Прошло 50 лет с тех пор, как закончилась монополия М.И. Волобуева на Pb/U изотопный анализ акцессориев Енисейского кряжа. К настоящему моменту количество лабораторий, оборудованных лазером и ICP масс-спектрометром, составило в России более десятка. Намного продуктивнее выполнить новые анализы, чем пытаться выудить рациональное зерно из большой массы сомнительного материала. По мнению первого автора данной статьи, в современных реалиях ссылки на изотопные данные М.И. Волобуева и его соавторов следует считать нерелевантными.

## 6. РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКИХ И АРХЕЙСКИХ ГРАНИТОВ И МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ПОРОД В ЗААНГАРЬЕ

На геологических картах Енисейского кряжа, составленных красноярскими геологами [Kachevsky et al., 1998; State Geological Мар..., 2005, 2010; и др.], не менее 10 % площади Заангарья закартировано в качестве архейских гнейсов, плагиогнейсов и кристаллических сланцев, прорванных архейскими и палеопротерозойскими гранитами. После того как мы предложили считать изотопные анализы М.И. Волобуева недостоверными, следует обсудить оставшиеся критерии, используемые красноярскими геологами для обоснования раннедокембрийского возраста указанных пород. Наиболее полная аргументация приведена в малотиражном (100 экз.) издании [Diener et al., 2006], где даны общие сведения о предполагаемых архейских и палеопротерозойских комплексах Заангарья и более детально рассмотрен сложенный ими участок в бассейнах рек Чиримба, Панимба, Еруда и Вангаш, который цитируемые авторы считают наиболее изученным. Ерудинский «палеопротерозойский плагиогранитный комплекс», которому посвящена брошюра, целиком заключен в метаморфических породах амфиболитовой фации, представленных биотит-гранатовыми плагиогнейсами, амфиболитами, мраморами и редкими кварцитами. В породах отмечен дистен, реже силлиманит и моноклинный пироксен. Упоминается также и гиперстен, но, по мнению редактора издания, его присутствие не доказано. Собственно Ерудинский магматический комплекс представлен мигматитами и гнейсогранитами трондьемитового, тоналитового и диоритового состава.

В качестве обоснования древнего возраста пород авторы указывают на налегание кварцитов и высокоглиноземистых сланцев тейской серии (нижний мезопротерозой?) на ерудинские плагиогнейсы. Контакт не описан и, по-видимому, не вскрыт. Также предпринята попытка определить возраст ерудинских гранитоидов Rb/Sr методом. Авторы построили четыре Rb/Sr изохроны по валовым пробам (по 4–9 анализов на каждую) с возрастом 2379±99, 2120±21, 2273±76 и 2490 ±26 млн лет [Diener et al., 2006]. Начальное отношение изотопов стронция составило 0.7162, 0.7037, 0.71702 и 0.70887 соответственно. Минеральный состав проанализированных образцов не указан, вероятно, авторы старались брать наиболее контрастные образцы, чтобы получить растяжку в Rb/Sr отношениях. Высокие концентрации рубидия в некоторых анализах, составляющие несколько сотен г/т (до 665 г/т), вряд ли возможны в «плагиогранитах» и соответствуют высококалиевым породам.

Изохронный Rb/Sr метод датирования применим при соблюдении трех условий.

1. Проанализированные образцы пород или минералов должны были кристаллизоваться из единой изотопно-гомогенной порции магмы. 2. Для построения изохроны образцы должны различаться отношением Rb/Sr. 3. Опробованный объем породы после кристаллизации должен сохраниться в виде закрытой изотопной системы, т.е. без привноса или выноса довольно подвижных рубидия и стронция. Проанализированные в работе [Diener et al., 2006] породы вряд ли отвечают перечисленным критериям. Судя по описаниям, гранитная лейкосома неравномерно пропитывает некий неоднородный субстрат. Породы метаморфизованы в неопротерозое, и в них внедрялись неопротерозойские граниты, что, вероятно, не прошло бесследно для сохранности Rb/Sr изотопной системы. Сами авторы сообщают, что плагиогранитный Устьтальский массив (первая изохрона) интенсивно переработан в процессе внедрения калишпатовых неопротерозойских гранитов.

Участок, обсуждаемый в этом издании, сравнительно полно охарактеризован современными Pb/U датировками. В работе [Vernikovsky et al., 2016] приведены сведения о семи проанализированных образцах разнообразных гранитоидов. Оказалось, что их возраст лежит в диапазоне 880-860 млн лет (SHRIMP). По меньшей мере четыре образца гранитов и диоритов отобраны в пределах границ Ерудинского комплекса, который имеет, соответственно, неопротерозойский возраст. Следует отметить, что, судя по CL изображениям, некоторые образцы, в частности А-08-2, содержат характерные «мигматитовые» удлиненные цирконы с древним ядром и темной высокоурановой оболочкой. Такие граниты явно образовались за счет анатексиса более древних кремнекислых пород, которыми могли быть либо мезопротерозойские песчаники и сланцы, либо раннедокембрийские гнейсы.

В условиях плохой обнаженности Енисейского кряжа обосновать присутствие выходов раннедокембрийского фундамента на основании полевых геологических наблюдений о взаимоотношениях разновозрастных комплексов вряд ли возможно. В процессе геологических съемок архейские комплексы выделены на основании двух признаков: высокого метаморфизма пород и присутствия плагиогранитов или плагиогнейсов, которые считаются нетипичными для неопротерозоя [Diener et al., 2006]. Очевидно, что оба признака не являются надежными. Например, метаморфические породы, вмещающие Гаревский плутон, резко контрастируют с ним и действительно имеют «древний облик», достойный архея (см. рис. 6, е). Но известно, что внедрению Гаревского плутона предшествовал этап метаморфизма и анатексиса в интервале 900–800 млн лет [Kuzmichev, Sklyarov, 2016]. Этот этап широко проявился в Заангарье, и, как показано в цитируемой работе, возраст лейкосомы мигматитов в районе устья р. Вятка, закартированных в составе архейского комплекса, оказался неопротерозойским. Возраст мигматизированного протолита может являться как мезопротерозойским (тейская и сухопитская серии), так и более древним.

Плагиограниты (тоналиты) позднеархейского возраста (2614±15 млн лет) действительно встречаются в этой части Енисейского кряжа [Kuzmichev, Srkyarov, 2016], но распространены локально (следует отметить, что указанная датировка безосновательно оспаривается в работе [Likhanov et al., 2018]). Более распространены именно неопротерозойские существенно плагиоклазовые гранитоиды. Возраст плагиогнейса, типичного для «малогаревской толщи архея» в верхнем течении р. Гаревка (в стратотипической местности), оказался неопротерозойским (882 млн лет [Kozlov et al., 2012]). Неопротерозойский возраст доказан и для осадочного протолита гранат-слюдяных сланцев с новообразованными порфиробластами альбита в районе Осиновского порога [Danukalova et al., 2022], закартированных ранее в качестве архейских плагиогнейсов [Kachevsky et al., 1998].

Пока что в Заангарье достоверно известны лишь два локальных выхода раннедокембрийских пород. Кроме уже упоминавшегося архейского тоналита, выход палеопротерозойского милонитизированного гранита найден на р. Чапа [Kuznetsov et al., 2020]. Оба этих пункта находятся на крайней периферии области распространения докембрийских метаморфических толщ (см. рис. 1). Раннедокембрийские метаморфические породы и гранитоиды не отличаются от неопротерозойских специфическим составом и отчетливыми картировочными признаками и могут быть выявлены только посредством геохронологических методов. Мы предполагаем, что в процессе дальнейшего изучения Енисейского кряжа таких неожиданных датировок появится больше. Будущим исследователям, однако, следует иметь в виду, что потенциально древние комплексы пород Заангарья подверглись метаморфизму амфиболитовой фации и частичному анатексису 900-800 млн лет назад. В этих условиях раннедокембрийские гнейсы и граниты являются первыми претендентами на переплавку. Если они и присутствуют в современном эрозионном срезе, то преимущественно в виде частично переплавленных реликтов среди неопротерозойских гранитоидов, или вообще от них могли сохраниться лишь реликтовые ядра в неопротерозойских цирконах.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные М.И. Волобуева о палеопротерозойском возрасте Гаревского гранитного массива, основанные на Pb-U-Th изотопных анализах циркона и ортита, не подтвердились. Опробование гранитов в том же пункте, где М.И. Волобуев отобрал свой единственный образец гранита с конкордантным палеопротерозойским (1730 млн лет) анализом, выявило их неопротерозойский (760 млн лет) возраст. Эта оценка согласуется с полученными ранее результатами изотопного датирования западной части Гаревского массива (752 млн лет [Vernikovsky et al., 2003]). Проведенное датирование еще трех образцов гранитов из разных частей массива выявило их аналогичный возраст и показало, что массив гомогенный и не содержит реликтовых включений более древних пород. Конкордантная палеопротерозойская датировка М.И. Волобуева является артефактом, для которого не существует рационального объяснения. Вопрос о возможном палеопротерозойском возрасте Гаревского плутона или какой-то его части закрыт.

Среди разрозненных донеопротерозойских датировок гранитоидов Заангарья, полученных М.И. Волобуевым с соавторами, Гаревский массив является единственным объектом, для которого имеется несколько Pb/U анализов, образующих объяснимую, согласованную изотопную систему. После того как и эти данные не прошли верификацию, мы предложили все древние датировки этого коллектива расценивать как непригодные для обоснования архейского или палеопротерозойского возраста пород заангарской части Енисейского кряжа.

Обоснование неопротерозойского возраста Гаревского гранитного массива не отрицает возможности присутствия в Заангарье выходов архейских и палеопротерозойских гранитоидов и метаморфических пород. К настоящему времени присутствие таких выходов подтверждено корректными геохронологическими данными только для двух локальных пунктов, расположенных на периферии главного района распространения метаморфических пород, закартированных в качестве архейского комплекса. Дальнейшее геохронологическое изучение гранитоидов и метаморфических пород Заангарья, несомненно, выявит присутствие дополнительных выходов докембрийского Сибирского фундамента.

#### 8. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны М.А. Святловской за участие в полевых работах, А.В. Антонову, выполнившему изучение цирконов на оптическом и электронном микроскопах, и А.Н. Ларионову – за проведение изотопного анализа. Авторы благодарны П.С. Козлову за тщательный анализ рукописи, полезные комментарии и рекомендации и анонимному рецензенту – за конструктивный отзыв.

## 9. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Полевые работы проведены первым автором; в обработку материалов и подготовку рукописи к публикации оба автора внесли эквивалентный вклад. The first author carried out the fieldwork; both authors contributed equally to the processing and preparation of the manuscript for publication.

#### 10. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

The authors declare that they have no conflicts of interest to declare. Both authors read and approved the final manuscript.

## **11. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES**

Black L.P., Kamo S.L., Allen C.M., Davis D.W., Aleinikoff J.N., Valley J.W., Mundil R., Campbell I.H., Korsch R.J., Williams I.S., Foudoulis C., 2004. Improved <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U Microprobe Geochronology by the Monitoring of a Trace-Element-Related Matrix Effect; SHRIMP, ID-TIMS, ELA-ICP-MS and Oxygen Isotope Documentation for a Series of Zircon Standards. Chemical Geology 205 (1–2), 115–140. https://doi.org/10. 1016/j.chemgeo.2004.01.003.

Danukalova M.K., Kuzmichev A.B., Babitsky E.F., Dubensky A.S., 2022. Search for the Terrane That Collided with the Yenisei Margin of the Siberian Paleocontinent at the End of the Neoproterozoic. 2. "Archean Block" in the Northwest of the Isakov Domain of the Yenisei Ridge. In: Geodynamic Evolution of the Lithosphere of the Central Asian Mobile Belt (from Ocean to Continent). Proceedings of Scientific Meeting (October 18-21, 2022). Iss. 20. IEC SB RAS, Irkutsk, p. 63–65 (in Russian) [Данукалова М.К., Кузьмичев А.Б., Бабицкий Е.Ф., Дубенский А.С. Поиски террейна, столкнувшегося с Енисейской окраиной Сибирского палеоконтинента в конце неопротерозоя. 2. «Архейский блок» на северо-западе Исаковского домена Енисейского кряжа // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы научного совещания (18-21 октября 2022 г.). Иркутск: ИЗК СО РАН, 2022. Вып. 20. С. 63-65].

Datsenko V.M., 1984. Granitoid Magmatism of the Southwestern Margin of the Siberian Platform. Nauka, Novosibirsk, 120 p. (in Russian) [Даценко В.М. Гранитоидный магматизм юго-западного обрамления Сибирской платформы. Новосибирск: Наука, 1984. 120 с.].

Diener A.E., Storozhenko A.A., Vasiliev N.F., 2006. Standard of the Yeruda Plagiogranite Complex (Yenisei Ridge). SNIGGiMS, Novosibirsk, 102 p. (in Russian) [Динер А.Э., Стороженко А.А., Васильев Н.Ф. Эталон ерудинского плагиогранитного комплекса (Енисейский кряж). Новосибирск: СНИИГГиМС, 2006. 102 с.].

Kachevsky L.K., Kachevskaya G.I., Grabovskaya J.M., 1998. Geological Map of the Yenisei Ridge. Krasnoyarsk Geological Survey, Krasnoyarsk (in Russian) [Качевский Л.К., Качевская Г.И., Грабовская Ж.М. Геологическая карта Енисейского кряжа. Масштаб 1:500000. Красноярск: Красноярскгеолсъемка, 1998].

Kachevsky L.K., Kachevskaya G.I., Storozhenko A.A., Zuev V.K., Diener A.E., Vasiliev N.F., 1994. To the Question of the Separation of Archean Metamorphic Complexes in the Trans-Angara Part of the Yenisei Ridge. National Geology 11–12, 45–49 (in Russian) [Качевский Л.К., Качевская Г.И., Стороженко А.А., Зуев В.К., Динер А.Э., Васильев Н.Ф. К вопросу о выделении архейских метаморфических комплексов в заангарской части Енисейского кряжа // Отечественная геология. 1994. № 11–12. С. 45–49].

Kozlov P.S., Likhanov I.I., Reverdatto V.V., Zinoviev S.V., 2012. Tectonometamorphic Evolution of the Garevka Polymetamorphic Complex (Yenisei Ridge). Russian Geology and Geophysics 53 (11), 1133–1149. https://doi.org/10.1016/ j.rgg.2012.09.002.

Kuzmichev A.B., 1987. Tectonics of the Isakov Synclinorium of the Yenisei Ridge. Brief PhD Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). Moscow, 19 p. (in Russian) [Кузьмичев А.Б. Тектоника Исаковского синклинория Енисейского кряжа: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 1987. 19 с.].

Kuzmichev A.B., Sklyarov E.V., 2016. The Precambrian of Transangaria, Yenisei Ridge (Siberia): Neoproterozoic Microcontinent, Grenville-Age Orogen, or Reworked Margin of the Siberian Craton? Journal of Asian Earth Sciences 115, 419–441. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015. 10.017.

Kuznetsov N.B., Kolesnikova A.A., Priyatkina N.S., Romaniuk T.V., Shatsillo A.V., 2020. Age and Geochemical Characteristics of Metagranites of the Yenisei Ridge: Siberian Roots of the Central Angara Terrane. In: Geodynamic Evolution of the Lithosphere of the Central Asian Mobile Belt (from Ocean to Continent). Proceedings of Scientific Meeting (October 20–23, 2020). Iss. 18. IEC SB RAS, Irkutsk, p. 193– 196 (in Russian) [Кузнецов Н.Б., Колесникова А.А., Прияткина Н.С., Романюк Т.В., Шацилло А.В. Возраст и геохимические характеристики метагранитов Енисейского кряжа: Сибирские корни Центрально-Ангарского террейна // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы научного совещания (20-23 октября 2020 г.). Иркутск: ИЗК СО РАН, 2020. Вып. 18. C. 193-196].

Likhanov I.I., Kozlov P.S., Reverdatto V.V., Popov N.V., 2018. Nature and Age of Detrital Zircons from Rocks of the Shear Zone: The Problem of Occurrence of the Archean Basement in the Transangarian Yenisei Ridge. Doklady Earth Sciences 480, 568–572. https://doi.org/10.1134/S1028334X180 50161.

Ludwig K.R., 2001. Squid 1.02: A User Manual. Berkeley Geochronological Center Special Publication No. 2. Berkeley, USA, 19 p.

Ludwig K.R., 2003. User's Manual for Isoplot/EX, Version 3.00. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication No. 4. Berkeley, USA, 71 p.

Nozhkin A.D., Bibikova E.V., Turkina O.M., Ponomarchuk V.A., 2003. U-Pb, Ar-Ar, and Sm-Nd Isotope-Geochronological Study of Porphyritic Subalkalic Granites of the Taraka Pluton (Yenisei Range). Russian Geology and Geophysics 44 (9), 879–889. 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.

State Geological Map of the Russian Federation, 2005. Scale 1:1000000. Sheet O-46 (Krasnoyarsk). Map of Prequaternary Formations. Krasnoyarsk Geological Survey, Krasnoyarsk, 1 sh. (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000. Лист О-46 (Красноярск): Карта дочетвертичных образований. Красноярск: Красноярскгеолсъемка, 2005. 1 л.].

State Geological Map of the Russian Federation, 2009. Angara-Yenisei Series. Scale 1:1000000. Sheet 0-46 (Krasnoyarsk). Explanatory Note. VSEGEI Publishing House, Saint Petersburg, 500 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия Ангаро-Енисейская. Масштаб 1:1000000. Лист 0-46 (Красноярск): Объяснительная записка. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2009. 500 с.].

State Geological Map of the Russian Federation, 2010. Angara-Yenisei Series. Scale 1:1000000. Sheet P-46 (Severo-Yenisei). Explanatory Note and a Set of Maps. VSEGEI Publishing House, Saint Petersburg, 470 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия Ангаро-Енисейская. Масштаб 1:1000000. Лист P-46 (Северо-Енисейский): Объяснительная записка и комплект карт. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2010. 470 с.].

State Geological Map of the Russian Federation, 2018. Yenisei Series. Scale 1:200000. Sheets P-46-XXXII (Kovriga). Explanatory Note and a Set of Maps. Moscow Branch of VSEGEI, Moscow, 143 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия Енисейская. Масштаб 1:200000. Лист P-46-XXXII (г. Коврига): Объяснительная записка и комплект карт. М.: МФ ВСЕГЕИ, 2018. 143 с.].

Storozhenko A.A., Vasiliev N.F., 2012. Gold Content Map of the Northern Part of the Yenisei Ridge. Scale 1:200000. Krasnoyarsk Geological Survey, Krasnoyarsk (in Russian) [Стороженко А.А., Васильев Н.Ф. Карта золотоносности северной части Енисейского кряжа. Масштаб 1:200000. Красноярск: Красноярскгеолсъемка, 2012].

Vernikovskaya A.E., Vernikovsky V.A., Sal'nikova E.B., Yasenev A.M., Kotov A.B., Kovach V.P., Travin A.V., Yakovleva S.Z., Fedoseenko A.M., 2006. Neoproterozoic A-Type Granites of the Garevka Massif, Yenisey Ridge: Age, Sources, and Geodynamic Setting. Petrology 14, 50–61. https://doi.org/ 10.1134/S086959110601005X.

Vernikovsky V.A., Metelkin D.V., Vernikovskaya A.E., Matushkin N.Y., Kazansky A.Y., Kadilnikov P.I., Romanova I.V., Wingate M.T.D., Larionov A.N., Rodionov N.V., 2016. Neoproterozoic Tectonic Structure of the Yenisey Ridge and Formation of the Western Margin of the Siberian Craton Based on New Geological, Paleomagnetic, and Geochronological Data. Russian Geology and Geophysics 57 (1), 47–68. https:// doi.org/10.1016/j.rgg.2016.01.004. Vernikovsky V.A., Vernikovskaya A.E., Kotov A.B., Sal'nikova E.B., Kovach V.P., 2003. Neoproterozoic Accretionary and Collisional Events on the Western Margin of the Siberian Craton: New Geological and Geochronological Evidence from the Yenisey Ridge. Tectonophysics 375 (1–4), 147–168. https://doi.org/10.1016/S0040-1951(03)00337-8.

Volobuev M.I., Stupnikov N.I., Zykov S.I., 1973. Yenisei Ridge. In: Yu.I. Polovinkina (Ed.), Geochronology of the USSR. Vol. 1. Nedra, Leningrad, p. 189–201 (in Russian) [Волобуев М.И., Ступникова Н.И., Зыков С.И. Енисейский кряж / Ред. Ю.И. Половинкина // Геохронология СССР. Л.: Недра, 1973. Т. 1. С. 189–201].

Volobuev M.I., Zykov S.I., Musatov D.I., Stupnikov N.I., 1964a. Stratigraphy and Magmatic Complexes of the Yenisei Ridge According to Geologic and Radiologic Data. In: Geology of the Southwestern Margin of the Siberian Platform. Nedra, Moscow, p. 8–58 (in Russian) [Волобуев М.И., Зыков С.И., Мусатов Д.И., Ступникова Н.И. Стратиграфия и магматические комплексы Енисейского кряжа по геологическим и радиологическим данным // Геология юго-западного обрамления Сибирской платформы. М.: Недра, 1964. С. 8–58].

Volobuev M.I., Zykov S.I., Stupnikova N.I., 1976. Geochronology of Precambrian Formations of the Sayano-Yenisei Region of Siberia. In: G.D. Afanasyev, A.P. Vinogradov, E.K. Kirping, L.N. Ovchinnikov, T.B. Pekarskaya (Eds), Topical Issues of Modern Geochronology. Nauka, Moscow, p. 96–123 (in Russian) [Волобуев М.И., Зыков С.И., Ступникова Н.И. Геохронология докембрийских формаций Саяно-Енисейского региона Сибири // Актуальные вопросы современной геохронологии / Ред. Г.Д. Афанасьев, А.П. Виноградов, Э.К. Кирпинг, Л.Н. Овчинников, Т.Б. Пекарская. М.: Наука, 1976. С. 96–123].

Volobuev M.I., Zykov S.I., Stupnikova N.I., Musatov D.I., Zatsepina E.F. 1964b. Interpretation of Absolute Age Values of Rock-Forming and Accessory Minerals of the Yenisei Ridge and Eastern Sayan. In: S.A. Leskov (Ed.), New Data on the Geology of the South of the Yenisei Ridge. Krasnoyarsk Book Publishing House, Krasnoyarsk, p. 272–294 (in Russian) [Волобуев М.И., Зыков С.И., Ступникова Н.И., Мусатов Д.И., Зацепина Е.Ф. Интерпретация значений абсолютного возраста породообразующих и акцессорных минералов Енисейского кряжа и Восточного Саяна // Новые данные по геологии юга Енисейского кряжа / Ред. С.А. Лесков. Красноярск: Красноярское книжное издательство, 1964. С. 272–294].

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 Newsletter 19 (1), 1–23. https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.1995.tb00147.x.

Williams I.S., 1997. 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.