

**A POTENTIAL EARLY PROTEROZOIC ZIRCON REFERENCE MATERIAL BAI-1-2023 FOR IN SITU U-Pb DATING**

A.V. Ivanov ¹, N.V. Bryansky ^{1,2}, U.S. Efremova ¹, E.A. Gladkochub ¹, A.A. Karimov ^{1,2}, E.I. Demonterova ¹, E.A. Mikheeva ¹, Yu.D. Shcherbakov ², A.S. Dubenskiy ³, V.S. Sheshukov ³, K.G. Erofeeva ³, O.I. Okina ³, V.B. Khubanov ^{4,5}, D.V. Semenova ⁶, A.V. Karpov ⁶, N.V. Rodionov ⁷, V.G. Davydov ⁷, A.N. Larionov ⁷, S.L. Votyakov ⁸, M.V. Chervyakovskaya ⁸, V.S. Chervyakovsky ⁸, E.A. Pankrushina ⁸, D.A. Mandrygina ⁸, A.V. Kulikova ⁹, K.R. Minnebaev ⁹, L.-L. Zhang ¹⁰, N.M. Kudryashov ¹¹

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

²Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1A Favorovskiy St, Irkutsk 664033, Russia

³Geological Institute, Russian Academy of Sciences, 7-1 Pyzhevskiy Ln, Moscow 119017, Russia

⁴Dobretsov Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 6a Sahyanova St, Ulan-Ude 670047, Republic of Buryatia, Russia

⁵Shmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 10-1 Bolshaya Gruzinskaya St, Moscow 123242, Russia

⁶Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

⁷Karpinsky Russian Geological Research Institute, 74 Sredny Ave, Saint Petersburg 199106, Russia

⁸Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 15 Academician Vonsovskiy St, Yekaterinburg 620010, Russia

⁹Institute of Geology and Petroleum Technologies, Kazan Federal University, 4-5 Kremlevskaya St, Kazan 420008, Russia

¹⁰Institute of Earth Sciences, China University of Geosciences, 29 Xue-Yuan Rd, Haidian, Beijing 100083, China

¹¹Geological Institute, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, 14 Fersman St, Apatites 184209, Russia

ABSTRACT. This study presents U-Pb dating results for zircon collected from the beaches of recreation zone "Peschanaya" (Sandy) on Lake Baikal. These beaches are formed exclusively by the erosion of Early Proterozoic rapakivi granites from the Primorsky Complex. Zircon from the granites yields a U-Pb age (ID-TIMS) of 1859 ± 16 Ma, with an average U concentration of ~ 120 $\mu\text{g/g}$. Analysis of detrital zircon from the beaches of recreation zone "Peschanaya" was conducted using the ID-TIMS method on three aliquots and two in-situ methods – LA-ICP-MS and SHRIMP – on multiple (>600) individual grains. The new ID-TIMS and SHRIMP data are in complete agreement with each other, yielding ages of 1853.6 ± 6.5 Ma and 1853.0 ± 3.3 Ma, respectively. The LA-ICP-MS data, obtained in 7 Russian and 1 Chinese laboratory, are in general consistence with these results. Zircon from the beaches of the recreational zone "Peschanaya" is recommended as a secondary standard for U-Pb dating of early Precambrian samples.

KEYWORDS: U-Pb; zircon; LA-ICP-MS; SHRIMP; ID-TIMS

FUNDING: The study was supported by the RSF (grant No. 25-77-30006, <https://rscf.ru/project/25-77-30006/>).

**RESEARCH ARTICLE**

Correspondence: Alexei V. Ivanov, aivanov@crust.irk.ru

Received: December 13, 2025

Revised: April 10, 2026

Accepted: April 14, 2026

FOR CITATION: Ivanov A.V., Bryansky N.V., Efremova U.S., Gladkochub E.A., Karimov A.A., Demonterova E.I., Mikheeva E.A., Shcherbakov Yu.D., Dubenskiy A.S., Sheshukov V.S., Erofeeva K.G., Okina O.I., Khubanov V.B., Semenova D.V., Karpov A.V., Rodionov N.V., Davydov V.G., Larionov A.N., Votyakov S.L., Chervyakovskaya M.V., Chervyakovsky V.S., Pankrushina E.A., Mandrygina D.A., Kulikova A.V., Minnebaev K.R., Zhang L.-L., Kudryashov N.M., 2026. A Potential Early Proterozoic Zircon Reference Material Bai-1-2023 for In Situ U-Pb Dating. *Geodynamics & Tectonophysics* 17 (3), 0897. doi:10.5800/GT-2026-17-3-0897

Supplementary files: [Ivanov_et_al_2026_Suppl-1.zip](#)

English version: see article page online

ПОТЕНЦИАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ ВА1-1-2023 РАННЕПРОТЕРОЗОЙСКОГО ЦИРКОНА ДЛЯ U-Pb ДАТИРОВАНИЯ ЛОКАЛЬНЫМИ МЕТОДАМИ

А.В. Иванов¹, Н.В. Брянский^{1,2}, У.С. Ефремова¹, Е.А. Гладкочуб¹, А.А. Каримов^{1,2},
Е.И. Демонтерова¹, Е.А. Михеева¹, Ю.Д. Щербаков², А.С. Дубенский³, В.С. Шешуков³, К.Г. Ерофеева³,
О.И. Окина³, В.Б. Хубанов^{4,5}, Д.В. Семенова⁶, А.В. Карпов⁶, Н.В. Родионов⁷, В.Г. Давыдов⁷,
А.Н. Ларионов⁷, С.Л. Вотяков⁸, М.В. Червяковская⁸, В.С. Червяковский⁸, Е.А. Панкрушина⁸,
Д.А. Мандрыгина⁸, А.В. Куликова⁹, К.Р. Миннебаев⁹, Л.-Л. Жанг¹⁰, Н.М. Кудряшов¹¹

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

² Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского 1А, Россия

³ Геологический институт РАН, 119017 Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 1, Россия

⁴ Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Республика Бурятия, Россия

⁵ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123242, Москва, Большая Грузинская, 10, стр. 1, Россия

⁶ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

⁷ Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, 199106, Санкт-Петербург, пр-т Средний, 74, Россия

⁸ Институт геологии и геохимии им. акад. А.Н. Заварицкого УРО РАН, 620010, Екатеринбург, ул. Академика Вонсовского, 15, Россия

⁹ Институт геологии и нефтегазовых технологий КФУ, 420111, Казань, ул. Кремлевская, 4/5, Россия

¹⁰ Институт наук о Земле, Китайский университет геонаук, 100083, Пекин, ул. Си-Юан, 29, Китай

¹¹ Геологический институт КНЦ РАН, 184209, Апатиты, ул. Ферсмана, 14, Россия

АННОТАЦИЯ. Приведены результаты изучения циркона, отобранного с пляжей рекреационной зоны «Песчаная» на Байкале. Эти пляжи сформированы исключительно при разрушении раннепротерозойских гранитов-рапакиви приморского комплекса. Циркон из гранитов имеет ID-TIMS U-Pb возраст 1859 ± 16 млн лет при среднем содержании U ~ 120 мкг/г. Описание детритового циркона из пляжей бухты Песчаной осуществлялось при помощи оптической микроскопии, сканирующей электронной микроскопии с анализом изображений обратно рассеянных электронов и катодоллюминесценции, а также методом спектроскопии комбинационного рассеяния света. Определение возраста выполнялось методом ID-TIMS по трем навескам и двумя методами локального анализа – LA-ICP-MS и SHRIMP – по множеству (>600) индивидуальных зерен. Новые данные ID-TIMS и SHRIMP полностью согласуются друг с другом, показывая возраст 1853.6 ± 6.5 и 1853.0 ± 3.3 млн лет соответственно. Данные LA-ICP-MS, полученные в семи российских и одной китайской лаборатории в целом согласуются с этими значениями. Циркон с пляжей рекреационной зоны «Песчаная» рекомендуется в качестве вторичного стандарта для контроля правильности датирования раннедокембрийских образцов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: U-Pb; циркон; LA-ICP-MS; SHRIMP; ID-TIMS

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование проведено при поддержке РФФИ (грант № 25-77-30006, <https://rscf.ru/project/25-77-30006/>).

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы происходит взрывной рост числа публикаций, включающих в себя данные изотопного U-Pb датирования циркона локальными методами анализа. При этом для корректного учета U-Pb фракционирования в ходе анализа требуется наличие стандартов аналогичной матрицы, что и датируемый минерал. Следует отметить, что желательны наличие таких стандартов в максимально широком диапазоне концентраций урана и возраста. Однако большинство стандартов циркона обладают возрастом не древнее ~ 1.1 млрд лет, имеется лишь два редко используемых раннедокембрийских стандарта с возрастом ~ 1.8 и ~ 3.5 млрд лет (табл. 1). Данное исследование имеет двойное значение: (1) осуществление проверки

правильности работы российских лабораторий, датирующих циркон локальными методами U-Pb анализа, и (2) предложение потенциально нового стандарта природного циркона, хотя бы частично закрывающего существующий провал в интервале древних возрастов (табл. 1).

2. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

2.1. Образцы циркона

Исследуемый циркон отобран с песчано-гравийных пляжей западного берега оз. Байкал в районе рекреационной зоны «Песчаная». Эти пляжи находятся в заливах, известных как бухты (с юга на север): Заверняиха, Академическая, Песчаная и Бабушка (рис. 1, а). В заметно меньшем объеме песчаный материал

встречается далее на север в бухтах Внучка и Сенная. Гравий и песок сформировались в результате разрушения гранитов-рапакиви приморского комплекса, которые выходят на поверхность в виде скал. Частично коренные обнажения гранитов-рапакиви

покрыты собственными продуктами выветривания в виде обломков различного размера, гравия и крупнозернистого песка. В прибрежной зоне песок и гравий окатываются в результате волноприбойной деятельности. Частично песок переотлагается вверх по

Таблица 1. Рекомендованные стандарты циркона для U-Pb датирования локальными методами
Table 1. Recommended zircon standards for U-Pb in-situ dating

Стандарт	Рекомендованный ID-TIMS возраст, млн лет	Интервал концентраций U, мкг/г	Источники
FCT-1	28.476±0.029	~200–850	[Schmitz, Bowring, 2001]
Plešovice	337.16±0.11	~460–3100*	[Sláma et al., 2008; Horstwood et al., 2016]
Temora-2	416.78±0.33	~80–320*	[Black et al., 2004]
R33	418.9±0.4	~60–400	[Black et al., 2004]
BR266	559.0±0.3	~870–960	[Stern, 2001]
M257	561.3±0.3	~790–900	[Nasdala et al., 2008]
GJ1	601.86±0.37	~210–420	[Horstwood et al., 2016; Jackson et al., 2004]
Mud Tank	731.65±0.49	~5–30	[Horstwood et al., 2016; Gain et al., 2019]
91500	1063.51±0.39	~70–85	[Wiedenbeck et al., 1995; Horstwood et al., 2016]
AS3 (Duluth)	1099.1±0.2	~110–630	[Schmitz et al., 2003]
QNGG	1842.0±3.1	~35–630	[Black et al., 2003]
OG1	3465.4±0.6	~120–230	[Stern et al., 2009]

Примечание. * – высокие концентрации U в стандарте Plešovice встречаются в зонах, которые не рекомендуется использовать для калибровки U-Pb фракционирования. Опыт работ со стандартом Temora-2 в Центре изотопных исследований Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского (г. Санкт-Петербург) показывает, что в этом стандарте также присутствуют высокоураниевые зоны.

Note. * – high U concentrations in Plešovice zircon are found in zones that are not recommended for use for calibration of U-Pb fractionation. Experience in working with the Temora 2 standard at the Center for Isotopic Research of the Karpinsky Russian Geological Research Institute (Saint Petersburg) has shown that this standard also contains high-uranium zones.



Рис. 1. Комплекс песчано-гравийных пляжей в районе рекреационной зоны «Песчаная».

(а) – космоснимок северо-западного побережья оз. Байкал, программа Google Earth; цифрами указаны места отбора проб песка, из которого выделен циркон для изотопных исследований; (б) – фотография бухты Песчаной зимой, с описанием геоморфологических элементов (по [Wika et al., 1999]).

Fig. 1. Complex of sand-gravel beaches in the area of recreation zone "Peschanaya" (Sandy).

(а) – view in Google Earth (numbers indicate sand sampling locations from which zircon was extracted for analysis); (б) – winter photograph of Peschanaya Bay, with a description of geomorphological elements (based on [Wika et al., 1999]).

склону в результате деятельности ветров, дующих со стороны оз. Байкал (рис. 1, б). Наиболее полное геоморфологическое описание рекреационной зоны «Песчаная» дано в монографии [Wika et al., 1999]. В частности, в ней отмечается, что даже среди эоловых отложений преобладают неокатанные зерна, что говорит о локальном источнике для песка. Пробы песка, из которого впоследствии выделен циркон, были отобраны в трех местах: непосредственно в прибрежной части бухты Заверняиха, на удалении от прибрежной части на ~50 м в бухте Бабушка и в средней части эолово-песчаного покрова в бухте Песчаной (рис. 1, а, б).

Граниты-рапакиви в бухте Сенной ранее были датированы U-Pb методом по циркону с использованием метода ID-TIMS 1859 ± 16 млн лет [Donskaya et al., 2003].

Содержание урана в цирконе составляет ~120 мкг/г [Donskaya et al., 2003].

2.2. Методы исследования

Для описания циркона в большинстве лабораторий, задействованных в этом исследовании, применялась оптическая микроскопия (ОМ), сканирующая электронная микроскопия (SEM) с анализом изображений обратно рассеянных электронов (BSE) и/или катодолюминесценции (CL). В двух лабораториях дополнительно применялся метод спектроскопии комбинационного рассеяния света (Raman). Общая информация об использованных методах и оборудовании приведена в табл. 2.

U-Pb датирование осуществлено методом масс-спектрометрии с термической ионизацией и изотопным

Таблица 2. Применяемые методики и оборудование для описания и датирования циркона Bai-1-2023

Table 2. The methodologies and equipment used for the description and dating of zircon Bai-1-2023

Организация	Методы исследования	Оборудование	Ссылка на публикации
ЦКП «Геодинамика и Геохронология», Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск	Оптическая микроскопия Raman LA-Q-ICP-MS	Микроскоп Olympus WiTec Alpha 300R Analyte Excite (193 nm) + Agilent 7900	[Ivanov et al., 2022]
ЦКП «Изотопно-геохимических исследований», Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск	SEM BSE, CL	Tescan MIRA 3 LMH	[Skuzovatov et al., 2022]
ЦКП «Геоспектр», Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, г. Улан-Удэ	SEM BSE LA-SF-ICP-MS	LEO1430VP NWR (213 nm) + Element XR	[Kanakan et al., 2022]
Геологический институт РАН, г. Москва	LA-SF-ICP-MS	NWR (213 nm) + Element XR	-
ЦКП «Многоэлементных и изотопных исследований», Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск	SEM SE, CL, LA-SF-ICP-MS	LEO1430 Analyte Excite (193 nm) + Element XR	[Semenova et al., 2024]
ЦКП «Геоаналитик», Институт геологии и геохимии им. акад. А.Н. Заварицкого УРО РАН, г. Екатеринбург	SEM BSE, CL Raman LA-Q-ICP-MS	LabRAM HR800 Evolution NWR (213 nm) + NexION 300S	[Votyakov et al., 2022; Zaitceva et al., 2016]
Институт геологии и нефтегазовых технологий КФУ, г. Казань	LA-Q-ICP-MS	Analyte Excite (193 nm) + iCAP-Q	[Minnebaev et al., 2025]
Центр изотопных исследований Всероссийского геологического института им. А.П. Карпинского, г. Санкт-Петербург	SEM BSE, CL SIMS LA-SF-MC-ICP-MS	CamScan MX2500 SHRIMP-IIe LSX-213 G2+ + Neptune	[Rodionov et al., 2012]
Институт наук о Земле Китайского университета геонаук, г. Пекин	LA-Q-ICP-MS	NewWave 193 UC + Agilent 7900	[Zhang et al., 2019]
ЦКП «Кольский центр геохронологических и изотопно-геохимических исследований», Геологический институт КНЦ РАН, г. Апатиты	ОМ ID-TIMS	Finnigan-MAT-262 (RPQ)	[Kudryashov, Mokrushin, 2011]

Примечание. Исследования в ЦКП «Геоаналитик» выполнены в рамках государственного задания Института геологии и геохимии им. акад. А.Н. Заварицкого УРО РАН № 12301180012-9, в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН выполнены в рамках государственного задания Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН – № FWZN-2026-0018, в ЦКП «Изотопно-геохимических исследований» Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН – FWEG-2026-0013. Исследования в ЦКП ГИН РАН выполнены в рамках государственного задания Геологического института РАН № 123032400058-6.

Note. The research conducted at the SRF "Geoanalyst" was carried out under the state assignment of the A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, No. 12301180012-9. The research at the SRF for Multielemental and Isotopic Studies was carried out under the state assignment of the Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, No. FWZN-2026-0018, the research at the SRF for Isotope-Geochemical Studies of the Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, was carried out under state assignment No. FWEG-2026-0013, the research at the SRF of the Geological Institute RAS was carried out under the state assignment of the Geological Institute RAS No. 123032400058-6.

разбавлением (ID-TIMS) по трем навескам, составившим от 0.6 до 1.5 мг, и двумя методами локального анализа. В большинстве лабораторий использовалась лазерная абляция с масс-спектрометрией с индуктивно связанной плазмой (LA-ICP-MS). Применялись масс-спектрометры с анализаторами двух типов – квадрупольными (Q-ICP-MS) и магнитно-секторными (SF-ICP-MS). В одной из лабораторий использовался многоколлекторный магнитно-секторный масс-спектрометр с индуктивно связанной плазмой (SF-MC-ICP-MS). Для абляции использовались либо твердотельные лазеры с длиной волны 213 нм, либо эксимерные лазеры с длиной волны 193 нм. Во всех случаях использовалась ячейка лазерной абляции двойного объема. В одной лаборатории применялась масс-спектрометрия вторичных ионов (SIMS) в варианте SHRIMP с кислородным источником. Информация суммирована в табл. 2.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ЦИРКОНА

3.1. Описание циркона

Зерна циркона представлены обломками, реже – кристаллами. По длинной оси размер кристаллов достигает 300 мкм, а по короткой – 150 мкм. Большинство зерен прозрачные, примерно половина зерен характеризуется слабой окраской, приобретенной из-за радиационных повреждений, а половина зерен с незначительными радиационными повреждениями – бесцветная (рис. 2, а). В зернах обычно присутствуют газожидкие включения и включения других минералов. Целые кристаллы призматические с преимущественным соотношением длины и ширины от 1.5 до 4.0 (рис. 2, а, б). На CL-изображениях отчетливо видна ростовая (осцилляторная) зональность (рис. 2, б). Все это характерно для циркона магматического генезиса [Corfu et

al., 2003]. У некоторых зерен видны зоны постмагматической перекристаллизации [Pidgeon, 1992], по-видимому, в условиях автотоматоза (рис. 2, б).

На рис. 3 приведен результат комплексного SEM CL и Raman изучения одного зерна циркона с отношением длинной оси к короткой, равным 4. Это зерно имеет два участка – центральный с двумя однородными светлыми и темными зонами и краевой, для которого отчетливо видны зоны роста, отражающиеся на CL изображении чередованием светлых и темных полос (рис. 3, а). На рис. 3, б, показан характерный спектр, на котором видны все колебательные моды – ER, ν_1 , ν_2 и ν_3 (рис. 3, б). Ширина пика ν_3 на его полувысоте (FWHM ν_3) обычно используется для оценки степени метамиктности циркона [Gao, Heide, 2020; Härtel et al., 2022]. На рис. 3, в, г, показаны профили FWHM ν_3 , снятые поперек и вдоль зерна циркона. Видно, что значения FWHM ν_3 варьируются в узком диапазоне значений, находясь на границе между полностью кристаллическим и частично поврежденным цирконом с промежуточной степенью радиационных повреждений.

Зерна циркона достаточно интенсивно люминесцируют. На рис. 4 представлены их типичные CL спектры, полученные с локальностью порядка 1 мкм. Интегральная яркость свечения варьируется по зернам более чем на порядок; спектры носят сложный суперпозиционный характер (рис. 4). Выделяется три группы широких полос в ближней УФ (А), синезеленой (В) и желтой (С) областях спектра с максимумами при 4.3–5.0, 2.6–3.5 и 2.1–2.3 эВ соответственно. Кроме описанных широких полос на спектрах CL фиксируются также узкие линии излучения, обусловленные ионами Dy³⁺, Tb³⁺, Gd³⁺ и др., замещающими в структуре минерала ионы Zr⁴⁺.

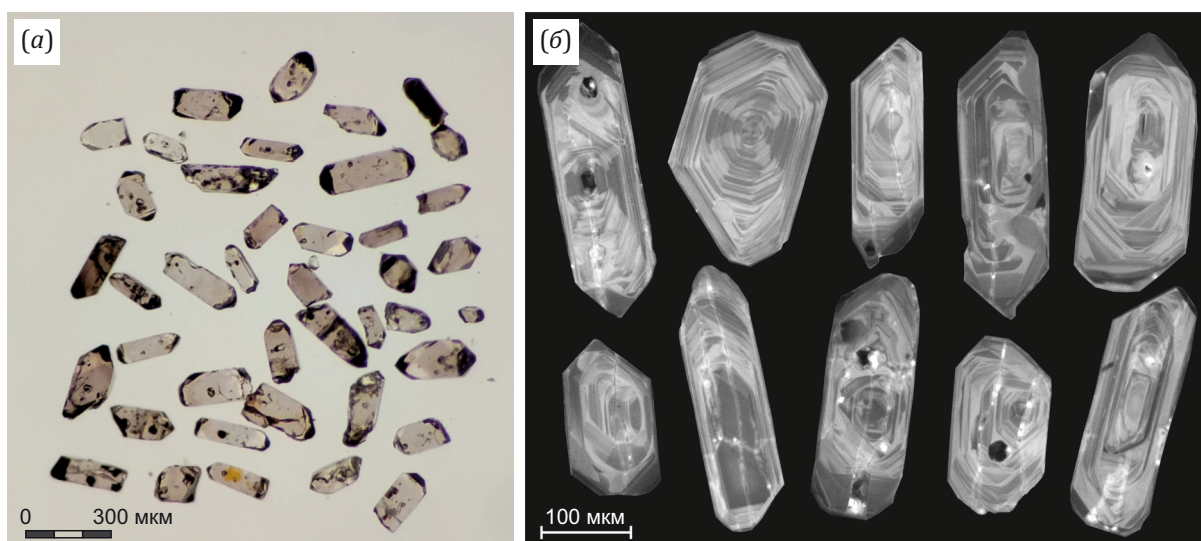


Рис. 2. Фотографии зерен циркона Bai-1-2023 под оптическим бинокулярным микроскопом (Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск) (а) и SEM CL (Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск) (б).

Fig. 2. Photos of Bai-1-2023 zircon grains under an optical binocular microscope (a) and SEM CL (b). Images are taken at the Institute of the Earth's Crust SB RAS (Irkutsk) and Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS (Novosibirsk), respectively.

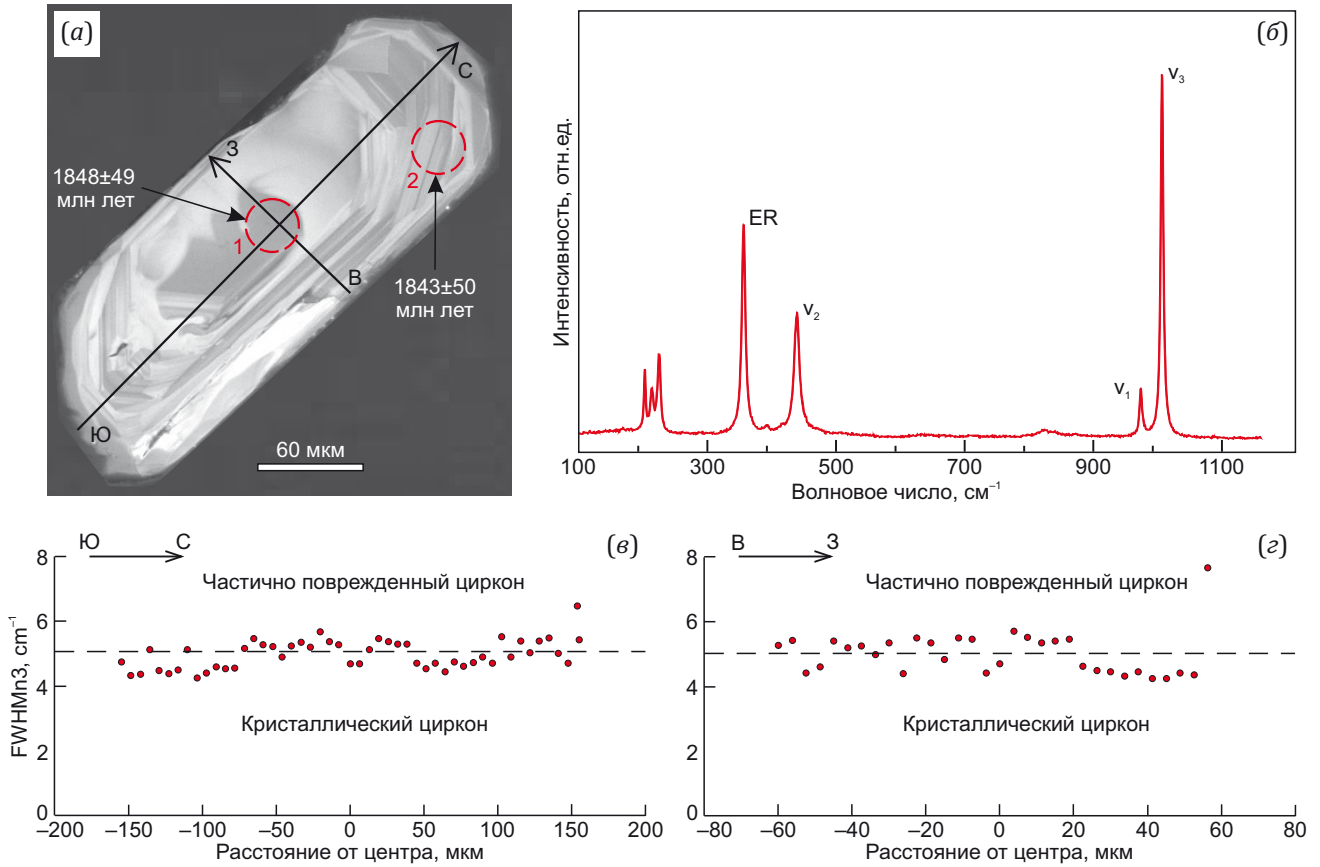


Рис. 3. Пример комплексного изучения зерна циркона Bai-1-2023. SEM CL (Tescan MIRA 3 LMH, Институт геохимии им. А.П. Виноградова, г. Иркутск) (а), Раман (WITec 300R, Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск) (б) и профили FWHM_{v3} поперек (в) и вдоль зерна (г) циркона. Степени повреждения циркона по [Gao, Heide, 2020].

Fig. 3. An example of a comprehensive study of zircon grain Bai-1-2023. SEM CL image using Tescan MIRA 3 LMH at Vinogradov Institute of Geochemistry of the SB RAS, Irkutsk (a), Raman spectrum using WITec 300R at the Institute of the Earth’s Crust SB RAS, Irkutsk (б), and FWHM_{v3} profiles across (в) and along (г) the grain. Degree of metamictization is after [Gao, Heide, 2020].

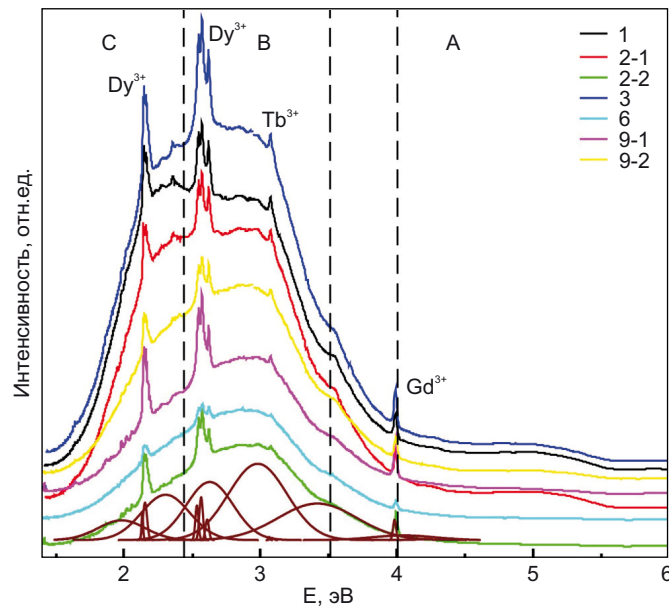


Рис. 4. Типичные CL спектры в различных зернах циркона Bai-1-2023 (Jeol JSM6390LV с приставкой Horiba H-CLUE iHR500, Институт геологии и геохимии им. акад. А.Н. Заварицкого УРО РАН, г. Екатеринбург).

Fig. 4. Typical CL spectra in different grains of zircon Bai-1-2023 obtained using Jeol JSM6390LV with Horiba H-CLUE iHR500 at Zavaritsky Institute of geology and geochemistry UB RAS, Yekaterinburg.

3.2. Результаты U-Pb датирования циркона

Предварительно зерна циркона, выделенные из песка бухт Заверняиха (Bai-1-2023, n=38), Песчаная (Bai-3-2023, n=41) и Бабушка (Bai-2-2023, n=42), были датированы методом LA-ICP-MS в Институте земной коры СО РАН. Полученные значения возраста по трем пробам статистически не различались между собой и в целом совпадали с опубликованным ID-TIMS возрастом [Donskaya et al., 2003]. С учетом того, что данные по пробе Bai-1-2023 из песков бухты Заверняиха ха-

рактеризовались наименьшим разбросом значения возраста, зерна циркона из этой пробы были предоставлены для исследования в других лабораториях.

На рис. 5 дано сопоставление результатов, полученных методами ID-TIMS и SHRIMP. Видно, что данные обоих методов согласуются между собой с той лишь разницей, что метод ID-TIMS характеризуется меньшей аналитической погрешностью, а локальный метод SHRIMP позволяет выбирать участки для датирования без потерь радиогенного свинца, что невозможно

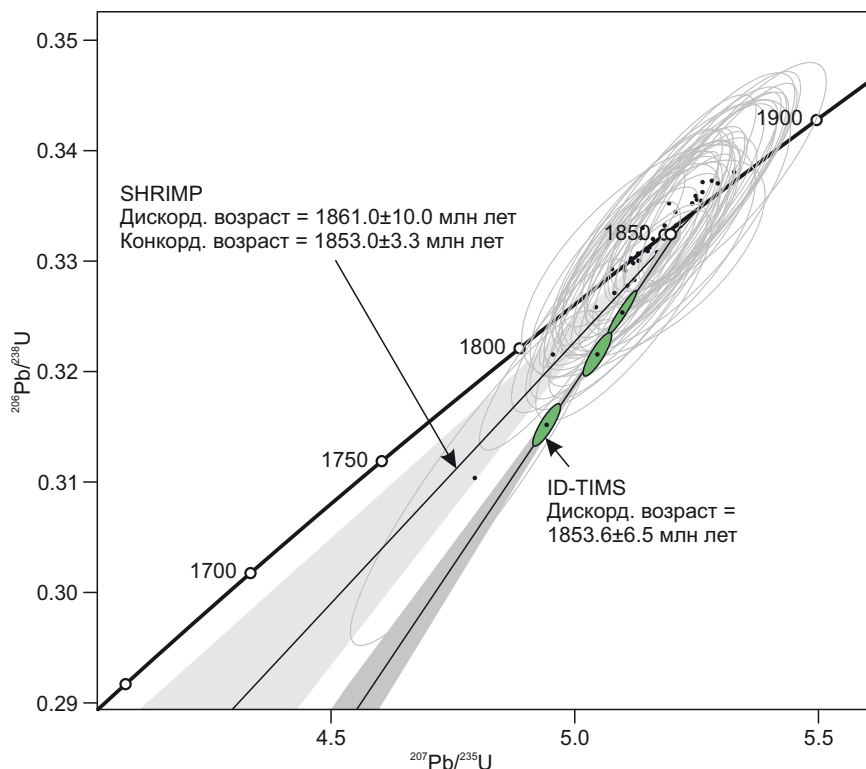


Рис. 5. Сравнение данных U-Pb датирования циркона Bai-1-2023 методом ID-TIMS (зеленые эллипсы) с данными датирования методом SHRIMP (прозрачные эллипсы). Диаграмма построена в программе IsoplotR [Vermeesch, 2018]. Конкордантный возраст для метода SHRIMP рассчитан после исключения двух наиболее дискордантных значений.

Fig. 5. Comparison of U-Pb dating of zircon Bai-1-2023 obtained by ID-TIMS (dark gray ellipses) with SHRIMP-IIe method (transparent ellipses). The diagram was plotted using IsoplotR software [Vermeesch, 2018].

Таблица 3. Данные датирования циркона Bai-1-2023 методом ID-TIMS

Table 3. Data on dating of Bai-1-2023 zircon by ID-TIMS

№	Концентрация		Изотопные отношения					Rho	Возраст, млн лет		
	Pb	U	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb
1	45.9	122.6	1382	0.12284±5	0.20159±4	0.3253±8	5.079±13	0.95	1816±5	1833±5	1852±2
2	52.9	121.1	1157	0.12482±5	0.33784±10	0.3215±8	5.025±15	0.85	1797±5	1824±5	1854±4
3	42.7	98.8	1133	1.12512±5	0.34831±10	0.3151±9	4.915±17	0.85	1763±5	1805±6	1855±4

Примечание. Навеска 1 – масса 1.5 мг, размер фракции 100–150 мкм, навеска 2 – масса 0.6 мг, размер фракции 75–100 мкм, навеска 3 – масса 0.7 мг, размер фракции – менее 100 мкм. Изотопные отношения исправлены на масс-фракционирование 1856, холостое загрязнение и обыкновенный свинец по модели [Stacey, Kramers, 1975]. Все ошибки в таблице приведены на уровне 2σ. Аналитические погрешности в U-Pb отношениях составили 0.5 %, и были использованы при расчете возраста.

Note. Aliquot 1 – mass 1.5 mg, fraction size 100–150 μm; Aliquot 2 – mass 0.6 mg, fraction size 75–100 μm; Aliquot 3 – mass 0.7 mg, fraction size <100 μm. Isotopic ratios were corrected for mass fractionation, blank contamination, and common lead using the model of [Stacey, Kramers, 1975]. All errors in the table are quoted at the 2σ level. Analytical uncertainties in the U-Pb ratios were 0.5 %, which were used in the age calculation.

в исследовании методом ID-TIMS, в котором использовались сравнительно крупные навески циркона с общей массой от 0.6 до 1.5 мг (табл. 3). Большинство измеренных значений методом SHRIMP локализуются на конкордии, однако есть значения с дискордантностью до 5 % (данные U-Pb датирования, полученные методом SHRIMP, представлены в Suppl. 1 на странице статьи онлайн). Значения дискордантности для метода ID-TIMS варьируются от 2.0 до 5.2 %. Возраст, рассчитанный по дискордии в методах ID-TIMS и SHRIMP, не отличается – 1861 ± 10 и 1853.6 ± 6.5 млн лет соответственно (рис. 5). Если исключить две наиболее дискордантные точки, то метод SHRIMP дает конкордантный возраст 1853.0 ± 3.3 млн лет.

Исходные данные LA-ICP-MS датирования всех лабораторий приведены в Suppl. 1. Для этой статьи данные, полученные в каждой из лабораторий, обработаны однотипно с расчетом конкордантного возраста и представлены на рис. 6.

Th-Pb датировку представили пять лабораторий (одна SHRIMP и четыре LA-ICP-MS) (Suppl. 1). Следует отметить, что для SHRIMP метода за исключением двух наиболее дискордантных в U-Pb изотопных координатах точек среднее из 38 анализов показало значение Th-Pb возраста 1847.7 ± 9.8 млн лет, согласующееся с U-Pb конкордантным возрастом. Ни одна из LA-ICP-MS лабораторий не смогла получить Th-Pb датировку, в согласии с U-Pb датировкой, что, очевидно, связано с методическими проблемами в LA-ICP-MS лабораториях.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

4.1. Рекомендованное значение возраста циркона Bai-1-2023

Все лаборатории исходно получили информацию о магматической природе циркона Bai-1-2023 и его раннепротерозойском возрасте без указания ожидаемых значений. Каждая из лабораторий изначально применяла свой подход к выбору зерен для анализа, количеству точек на зерно, использованию того или иного стандарта в качестве первичного метода редукции данных, выбору тех или иных изотопных отношений для расчета возраста. Результаты межлабораторного сравнительного тестирования циркона Bai-1-2023 показали [Ivanov et al., 2025], что все участвовавшие в тестировании лаборатории предложили в качестве интерпретации возраст, совпадающий с опубликованным возрастом ID-TIMS 1859 ± 16 млн лет для гранитов-рапакиви [Donskaya et al., 2003]. В этой работе была получена ID-TIMS датировка с меньшей погрешностью уже непосредственно для циркона Bai-1-2023, отобранного с пляжа Заверняиха: 1853.6 ± 6.5 млн лет (см. рис. 5). Датировка, полученная методом SHRIMP, полностью согласуется с ID-TIMS датировкой и составляет 1853.0 ± 3.3 млн лет. Датировки, полученные методом LA-ICP-MS в большинстве лабораторий, перекрываются аналитическими погрешностями с новой датировкой ID-TIMS, однако имеется тенденция завышения

датировок LA-ICP-MS в ряде лабораторий (рис. 7). В качестве референсного возраста циркона Bai-1-2023 рекомендуется использовать значение ID-TIMS 1853.6 ± 6.5 млн лет. Максимальное несоответствие с референсным значением получено в лаборатории 8 и составляет 0.6 % от возраста.

4.2. Сравнение циркона Bai-1-2023 с другими стандартами циркона

К минералам-стандартам для U-Pb датирования локальными методами анализа предъявляются следующие основные требования – во-первых, для них надежно установлен возраст, например методом ID-TIMS, во-вторых, они являются однородными и, в-третьих, доступными в достаточном количестве для повторного анализа. Такие стандарты выполняют две функции: относительно выбранного первичного стандарта рассчитывается возраст неизвестных образцов, они используются как вторичные стандарты для оценки правильности анализа и сравнения результатов между различными лабораториями. Первое и третье требование к стандартам относительно циркона Bai-1-2023 выполнено полностью. Для него известен возраст, полученный методом ID-TIMS, который подтвержден методом SHRIMP, а количество песка, содержащего детритовый циркон с возрастом исходных рапакиви-гранитов, практически безгранично. Что касается второго требования, данные U-Pb датирования показывают, что в пределах зерен имеются участки со значительными потерями радиогенного свинца, нарушением изотопной U-Pb системы, присутствием обыкновенного свинца (см. рис. 6). Соответственно, использование циркона Bai-1-2023 требует более тщательно подхода к выбору места для анализа, чем обычно выполняется в рутинном анализе других стандартов циркона.

При сравнении с другими распространенными стандартами циркона циркон Bai-1-2023 характеризуется более высокими степенями дискордантности, если ориентироваться на данные ID-TIMS (табл. 4). Однако следует отметить, что анализ ID-TIMS проводился по большим навескам (от 0.6 до 1.5 мг). При типичной размерности зерен в гранитах-рапакиви, такие навески содержат сотни зерен циркона. Очевидно, что при таком количестве зерен затруднительно отобрать зерна, не содержащие дефектов. В то же время локальные методы анализа, использованные в этом исследовании, показывают, что в целом не составляет труда выбрать одну точку с диаметром до 35 мкм на зерно, которая показывает конкордантный результат. Однако при выборе нескольких точек на зерно вероятность попадания в неоднородный участок с трещинами, включениями или повышенными радиационными повреждениями увеличивается. Так, из выполненных 673 анализов методом LA-ICP-MS в восьми лабораториях отсеяно было 70 (в основном за счет двух лабораторий), что в итоге составляет чуть более 10 %. В связи с этим при анализе циркона Bai-1-2023

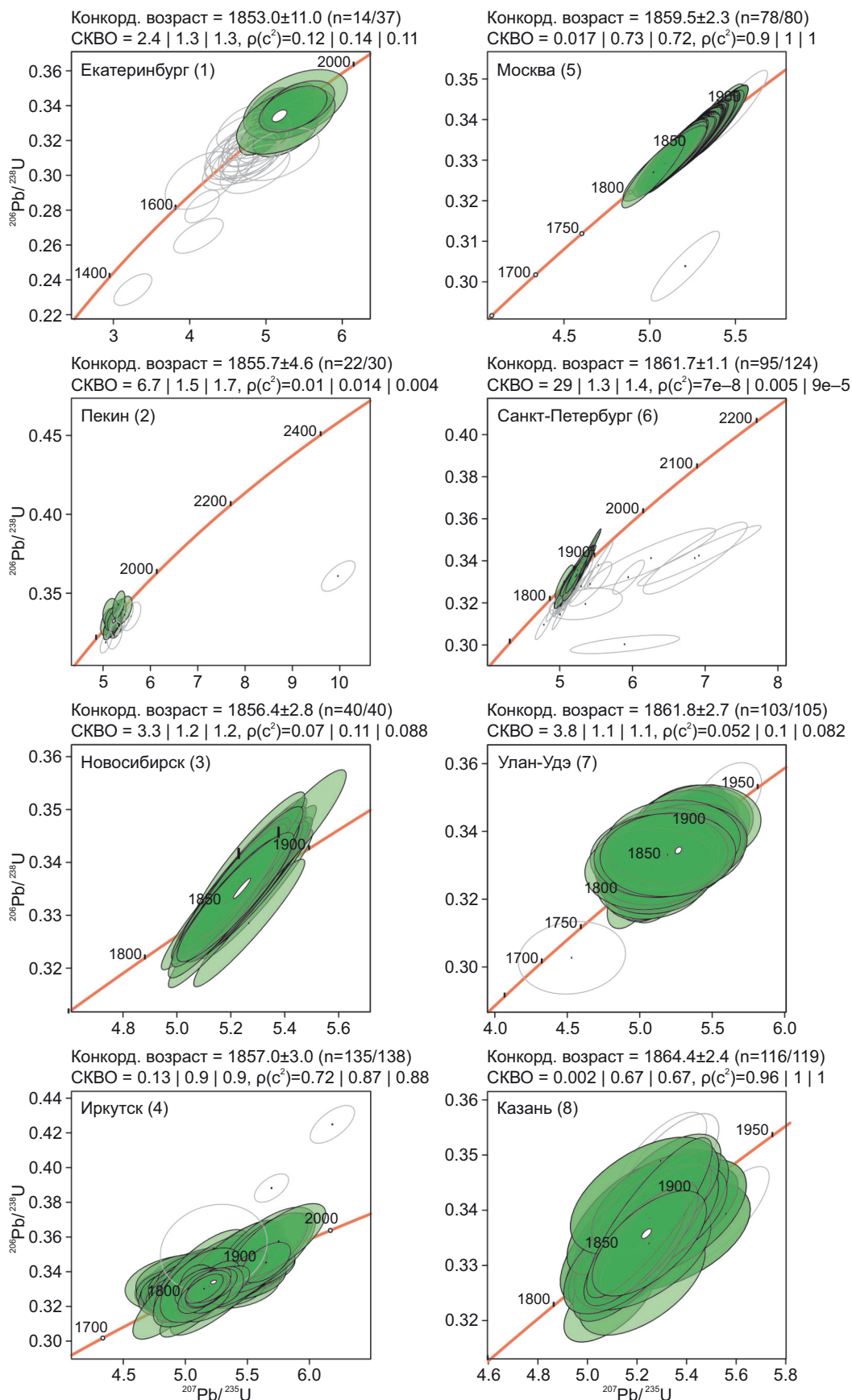


Рис. 6. Результаты U-Pb датирования методом LA-ICP-MS в восьми лабораториях (см. табл. 2). Зеленые эллипсы использованы для расчета конкордантного возраста, прозрачные эллипсы – исключенные из расчетов значения. Диаграмма построена в программе IsoplotR [Vermeesch, 2018]. Диаграммы ранжированы по увеличению возраста: (1) Екатеринбург – Институт геологии и геохимии им. акад. А.Н. Заварицкого УРО РАН; (2) Пекин – Институт наук о Земле,

Китайский университет геонаук; (3) Новосибирск – Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН; (4) Иркутск – Институт земной коры СО РАН; (5) Москва – Геологический институт РАН; (6) Санкт-Петербург – Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского; (7) Улан-Удэ – Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН; (8) Казань – Институт геологии и нефтегазовых технологий КФУ.

Fig. 6. Results of U-Pb dating by LA-ICP-MS from eight laboratories (see Table 2).

Green ellipses used for concordia age calculation; transparent ellipses – values excluded from the calculations. The diagram was constructed using the IsoplotR program [Vermeesch, 2018]. The diagrams are arranged in order of increasing age: (1) Yekaterinburg – Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry UB RAS; (2) Beijing – Institute of Earth Sciences, China University of Geosciences; (3) Novosibirsk – Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS; (4) Irkutsk – Institute of the Earth’s Crust SB RAS; (5) Moscow – Geological Institute RAS; (6) Saint-Petersburg – Karpinsky Russian Geological Research Institute; (7) Ulan-Ude – Dobretsov Geological Institute SB RAS; (8) Kazan – Institute of Geology and Petroleum Technologies, Kazan Federal University.

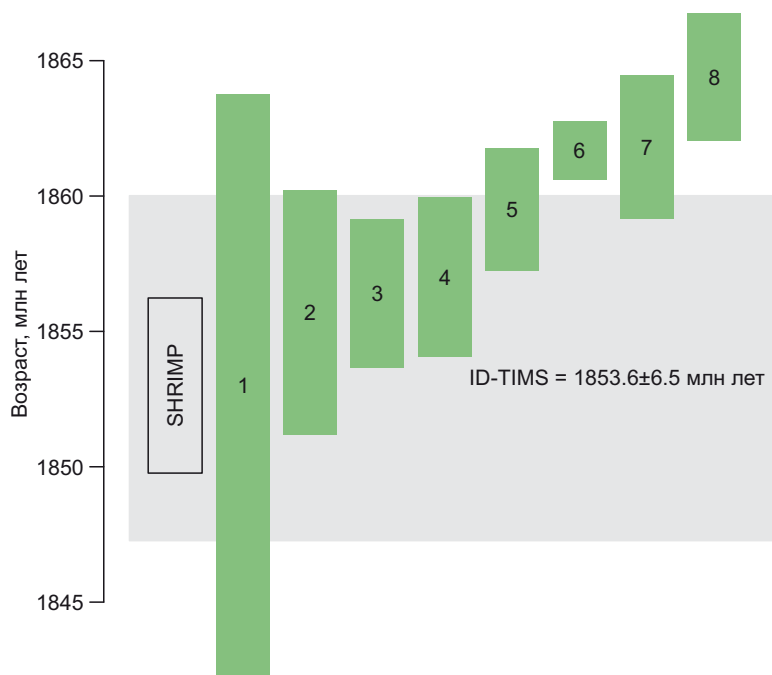


Рис. 7. Сопоставление данных, полученных локальными методами анализа (SHRIMP – незакрашенный прямоугольник, LA-ICP-MS – зеленые прямоугольники), с данными ID-TIMS (серое поле). Цифры в прямоугольниках соответствуют номеру лаборатории на рис. 6.

Fig. 7. Comparison of data acquired by in situ analytical techniques (SHRIMP – open rectangles; LA-ICP-MS – green rectangles) with ID-TIMS data (gray field). Numbers inside the rectangles correspond to numbers of the laboratories marked in Fig. 6.

Таблица 4. Значения FWHM_{v3} в цирконе Bai-1-2023, его степени радиационных повреждений и валовой дискордантности в сравнении с другими стандартами циркона

Table 4. The FWHM_{v3} values, degrees of radiation damage, and bulk discordance of Bai-1-2023 zircon compared to other zircon standards

Стандарт	FWHM _{v3}	Степень радиационных повреждений	Дискордантность % по данным ID-TIMS*
Bai-1-2023	4.5–14	От малой до средней	2.0–5.2
Plešovice	7.8–11.8	Средняя	0–1.7
Temora-2	5.9–6.6	Средняя	0–1.7
GJ1	6.2–6.8	Средняя	0.7–1.0
Mud Tank	2.2–2.5	Малая	0.3–0.5
91500	3.7–3.9	Малая	0–0.6

Примечание. Данные по FWHM_{v3} в стандартах Plešovice, Temora, GJ-1, Mud Tank и 91500 по [Votyakov et al., 2022]. Дискордантность рассчитана по данным работ, приведенных в табл. 1. Дискордантность циркона Bai-1-2023 рассчитана из данных в табл. 3. * – дискордантность рассчитана как $100 \cdot \left[\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}_{\text{возраст}} / \frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}_{\text{возраст}} - 1 \right]$ без учета аналитической погрешности.

Note. FWHM_{v3} data for the Plešovice, Temora, GJ-1, Mud Tank, and 91500 standards are from [Votyakov et al., 2022]. Discordance was calculated based on data from the studies listed in Table 1. Discordance for Bai-1-2023 is taken from Table 3. * – discordance is calculated as $100 \cdot \left[\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}_{\text{age}} / \frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}_{\text{age}} - 1 \right]$ without taking into account analytical uncertainty.

рекомендуется анализировать не более двух точек на зерно.

По степени радиационных повреждений, оцененных по параметру $FWHM_{\nu_3}$, циркон Bai-1-2023 наиболее близок к стандартам Plešovice, Temora-2 и GJ-1, которые характеризуются средней степенью (т.е. частично поврежденные) радиационных повреждений (табл. 4). Метамиктность циркона можно также оценить по центрам люминесценции (ЦЛ) [Votyakov et al., 2022]. Так, ЦЛ C_1 соответствуют широко известной «классической» желтой люминесценции минерала. Появление желтого свечения сопряжено с дефектами кремнекислородной подрешетки – разнообразными типами кислородных вакансий и дивакансий в SiO_4 -тетраэдрах; эти дефекты обеспечивают снижение кристалличности матрицы, которая напрямую зависит от содержания U и Th. Условно ЦЛ C_1 могут быть отнесены к классу радиационных. УФ и сине-зеленые ЦЛ A_1 и B_1 типичны для низкопримесной высококристаллической матрицы циркона. Повышенная интенсивность свечения этих центров служит надежным показателем стерильности матрицы, ее высокой кристалличности (отсутствия метамиктной составляющей). Ультрафиолетовые ЦЛ A_1 представляют из себя суперпозицию нескольких элементарных полос $A1-3$, обусловленных рекомбинационными переходами между электронными подуровнями нерегулярных дефектных цирконий-кислородных додекаэдров. Последние различаются между собой своей симметрией, электронной структурой и дают различный вклад в интегральный спектр

свечения ЦЛ A_1 . С вхождением в решетку минерала ионов Ti – близкого кристаллохимического аналога ионов Zr – связано появление сине-зеленого свечения ЦЛ B_1 . Внутренняя структура этого центра (полосы B и B_1) обусловлена симметричными и размерными различиями ближайшего кислородного окружения ионов Ti , замещающих Zr в структуре минерала. Следуя работе [Votyakov et al., 2022], для дискриминации зерен циркона по люминесцентным свойствам использована тройная $A_1 - B_1 - C_1$ диаграмма, демонстрирующая соотношение интегральных площадей перечисленных широких полос (рис. 8). Видно, что положение точек на диаграмме, соответствующих зернам циркона Bai-1-2023, образует некую протяженную зону преимущественно вдоль стороны C_1 , перекрывающуюся с таковой для GJ-1, Plešovice и, в меньшей степени, для 91500 (рис. 8).

Датируемые зерна циркона, особенно раннедокембрийского возраста, редко бывают без радиационных повреждений, других дефектов и включений, которые минимальны у стандартов циркона, используемых в качестве первичных. Иными словами, использование бездефектного циркона для контроля правильности измерения «дефектного» циркона ничего не говорит о правильности измерения именно «дефектного» циркона. В этом смысле недостатки циркона Bai-1-2023 являются его достоинствами, если его использовать в качестве вторичного стандарта для проверки правильности анализа реальных раннедокембрийских зерен циркона.

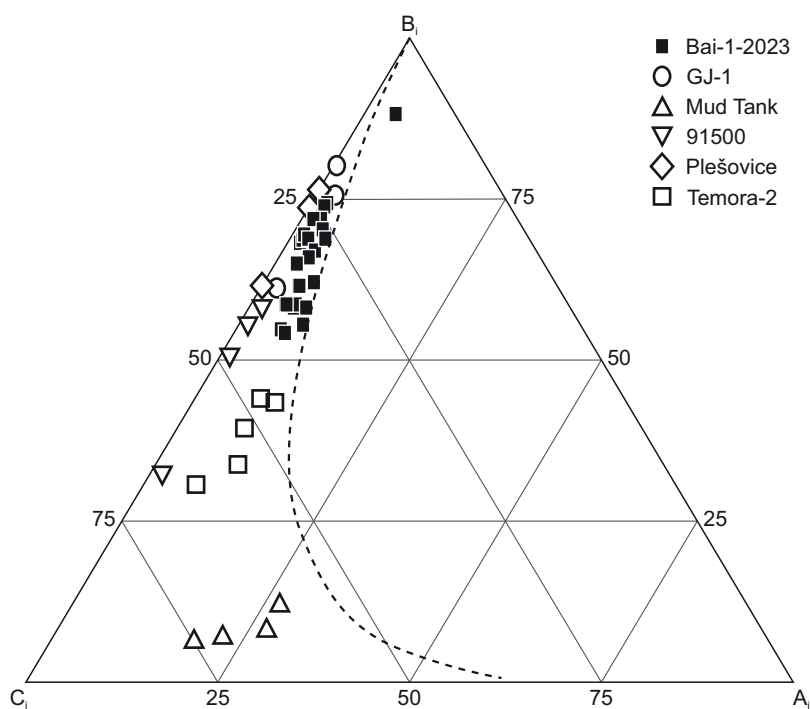


Рис. 8. Соотношение площадей полос $A_1 - B_1 - C_1$ в спектрах CL зерен циркона Bai-1-2023 в сопоставлении с данными по некоторым другим стандартам циркона [Votyakov et al., 2022].

Fig. 8. The ratio of the integral areas of the $A_1 - B_1 - C_1$ bands in the CL spectra of zircon Bai-1-2023 in comparison with data for some other zircon standards after [Votyakov et al., 2022].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Детритовый циркон с пляжей комплекса заливов (бухт) оз. Байкал, объединенных под названием рекреационная зона «Песчаная», является исключительно продуктом разрушения местных выходов гранитов-рапакиви приморского комплекса. Одна из проб детритового циркона (Bai-1-2023) была проанализирована в одной ID-TIMS лаборатории, одной SIMS (SHRIMP) лаборатории и восьми LA-ICP-MS лабораториях. Рекомендованный возраст циркона Bai-1-2023 по данным ID-TIMS составляет 1853.6 ± 6.5 млн лет. Датировка SHRIMP полностью согласуется с этим возрастом. Датировки в шести из восьми LA-ICPMS лабораторий в пределах погрешности анализа перекрываются с рекомендованным возрастом. Максимальное несоответствие между LA-ICPMS и ID-TIMS датировками составляет 0.6 %. Во всех восьми лабораториях было отбраковано порядка 10 % индивидуальных датировок. Циркон Bai-1-2023 менее однородный в сравнении с рядом широко применяемых стандартов возраста и может быть рекомендован в качестве вторичного стандарта возраста для контроля правильности измерений.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны Ю.А. Костицыну и А.В. Травину за ценные замечания.

7. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

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

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

8. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

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

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

9. 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 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 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>.

Black L.P., Kamo S.L., Williams I.S., Mundil R., Davis D.W., Korsch R.J., Foudoulis C., 2003. The Application of SHRIMP to Phanerozoic Geochronology; a Critical Appraisal of Four Zircon Standards. *Chemical Geology* 200 (1–2), 171–188. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(03\)00166-9](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(03)00166-9).

Corfu F., Hanchar J.M., Hoskin P.W.O., Kinny P., 2003. Atlas of Zircon Textures. *Reviews in Mineralogy and Geo-*

chemistry 53 (1), 469–500. <https://doi.org/10.2113/0530469>.

Donskaya T.V., Bibikova E.V., Mazukabzov A.M., Kozakov I.K., Gladkochub D.P., Kirnozova T.I., Plotkina Yu.V., Reznitsky L.Z., 2003. The Primorsky Granitoid Complex of Western Cisbaikalia: Geochronology and Geodynamic Typification. *Russian Geology and Geophysics* 44 (10), 1006–1016.

Gain S.E.M., Gréau Y., Henry H., Belousova E., Dainis I., Griffin W.L., O'Reilly S.Y. 2019. Mud Tank Zircon: Long-Term Evaluation of a Reference Material for U-Pb Dating, Hf-Isotope Analysis and Trace Element Analysis. *Geostandards and Geoanalytical Research* 43 (3), 339–354. <https://doi.org/10.1111/ggr.12265>.

Gao S., Heide G., 2020. Influence of Metamictization on the Gemological Properties of Natural Zircon: A Raman Spectroscopic Study of Zircons in the Gemological Collection of Abraham Gottlob Werner. *Journal of Raman Spectroscopy* 52 (1), 71–77. <https://doi.org/10.1002/jrs.6041>.

Härtel B., Jonckheere R., Ratschbacher L., 2022. Multi-Band Raman Analysis of Radiation Damage in Zircon for Thermochronology: Partial Annealing and Mixed Signals. *Geochemistry, Geophysics Geosystems* 23 (1), e2021GC010182. <https://doi.org/10.1029/2021GC010182>.

Horstwood M.S.A., Kosler J., Gehrels G., Jackson S.E., McLean N.M., Paton Ch., Pearson N.J., Sircombe K. et al., 2016. Community-Derived Standards for LA-ICP-MS U-(Th-)Pb Geochronology – Uncertainty Propagation, Age Interpretation and Data Reporting. *Geostandards and Geoanalytical Research* 40 (3), 311–332. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2016.00379.x>.

Ivanov A.V., Bryansky N.V., Efremova U.S., Gladkochub E.A., Karimov A.A., Mikheeva E.A., Demonterova E.I., Dubensky A.S. et al., 2025. Russian Interlaboratory Comparison for U-Pb Local Dating of a Known-Age Zircon. In: *Temporal Relationship Between the Formation of Magmatic Formations and Ore Deposits in the Metallogenic Provinces of Eurasia. Proceedings of IX Russian Conference on Isotopic Geochronology (June 3–5, 2025). IGEM RAS, Moscow, p. 66–68 (in Russian)* [Иванов А.В., Брянский Н.В., Ефремова У.С., Gladkochub E.A., Каримов А.А., Михеева Е.А., Демонтерова Е.И., Дубенский А.С. и др. Российский межлабораторный опыт U-Pb локального датирования образца циркона с известным возрастом // Соотношение времени образования магматических формаций и рудных месторождений в металлогенических провинциях Евразии: Материалы IX Российской конференции по изотопной геохронологии (3–5 июня 2025 г.). М.: ИГЕМ РАН, 2025. С. 66–68].

Ivanov A.V., Demonterova E.I., Revenko A.G., Sharygin I.S., Kozyreva E.A., Alexeev S.V., 2022. History and Current State of Analytical Research at the Institute of the Earth's Crust SB RAS: Centre for Geodynamics and Geochronology. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (2), 0582 (in Russian) [Иванов А.В., Демонтерова Е.И., Ревенко А.Г., Шарыгин И.С., Козырева Е.А., Алексеев С.В. История и современное состояние аналитических исследований в Институте земной коры СО РАН: Центр коллективного пользования «Геодинамика и геохронология» // Геодинамика

и тектонофизика. 2022. Т. 13. № 2. 0582]. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0582>.

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

Канакин С.В., Клубанов В.В., Жалсаарев В.Ж., Посохов В.Ф., Дампилова Б.В., Хромова Е.А., Хубанова А.М., Лыгденова Б.Б. Центр коллективного пользования «Геоспектр» Геологического института СО РАН // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13. № 2. 0583]. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0583>.

Kudryashov N.M., Mokrushin A.V., 2011. Mesoarchean Gabbroanorthosite Magmatism of the Kola Region: Petrochemical, Geochronological, and Isotope-Geochemical Data. *Petrology* 19 (2), 167–182. <https://doi.org/10.1134/S086959111102007X>.

Minnebaev K.R., Kulikova A.V., Kotler P.D., Nourgaliev D.K., Saetgaleeva Ya.Ya., 2025. Provenance of Carboniferous Clastic Deposits in the Central Part of the Volga-Ural Petroleum Province (Republic of Tatarstan) Revealed by Petrography and U-Pb (LA-ICP-MS) Detrital Zircon Isotopic Data. *Geodynamics & Tectonophysics* 16 (4), 0843 (in Russian) [Миннебаев К.Р., Куликова А.В., Котлер П.Д., Нурғалиев Д.К., Саётгалеева Я.Я. Источники обломочного материала каменноугольных терригенных отложений центральной части Волго-Уральской нефтегазоносной провинции (Республика Татарстан) по результатам минералого-петрографического изучения песчаников и U-Pb (LA-ICP-MS) изотопного изучения обломочных цирконов // Геодинамика и тектонофизика. 2025. Т. 16. № 4. 0843]. <https://doi.org/10.5800/GT-2025-16-4-0843>.

Nasdala L., Hofmeister W., Norberg N., Mattinson J.M., Corfu F., Dörr W., Kamo S.L., Kennedy A.K. et al., 2008. Zircon M257 – A Homogeneous Natural Reference Material for the Ion Microprobe U-Pb Analysis of Zircon. *Geostandards and Geoanalytical Research* 32 (3), 247–265. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2008.00914.x>.

Pidgeon R.T., 1992. Recrystallisation of Oscillatory Zoned Zircon: Some Geochronological and Petrological Implications. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 110 (4), 463–472. <https://doi.org/10.1007/BF00344081>.

Rodionov N.V., Belyatsky B.V., Antonov A.V., Kapitonov I.N., Sergeev S.A., 2012. Comparative In-Situ U-Th-Pb Geochronology and Trace Element Composition of Baddeleyite and Low-U Zircon from Carbonatites of the Palaeozoic Kovdor Alkaline-Ultramafic Complex, Kola Peninsula, Russia. *Gondwana Research* 21 (4), 728–744. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.10.005>.

Schmitz M.D., Bowring S.A., 2001. U-Pb Zircon and Titanite Systematics of the Fish Canyon Tuff: An Assessment of High-Precision U-Pb Geochronology and Its Application

to Young Volcanic Rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 65 (15), 2571–2587. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(00\)00239-6](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(00)00239-6).

Schmitz M.D., Bowring S.A., Ireland T.R., 2003. Evaluation of Duluth Complex Anorthositic Series (AS3) Zircon as a U-Pb Geochronological Standard: New High-Precision Isotope Dilution Thermal Ionization Mass Spectrometry Results. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 67 (19), 3665–3672. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(03\)00200-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(03)00200-X).

Semenova D.V., Vladimirov V.G., Karmysheva I.V., Yakovlev V.A., 2024. The Age of Early Collisional Granitoids of Western Sangilen (SE Tuva): Implications for Estimating the Duration of Orogeny at the Margin of the Tuva-Mongolian Massif. *Geodynamics & Tectonophysics* 15 (4), 0767 (in Russian) [Семенова Д.В., Владимиров В.Г., Кармышева И.В., Яковлев В.А. Возраст раннеколлизийных гранитоидов Западного Сангилен (Юго-Восточная Тува): значение для оценки длительности орогенеза на окраине Тувино-Монгольского массива // Геодинамика и тектонофизика. 2024. Т. 15. № 4. 0767]. <https://doi.org/10.5800/GT-2024-15-4-0767>.

Skuzovatov S.Yu., Belozeroва O.Yu., Vasil'eva I.E., Zarusina O.V., Kaneva E.V., Sokolnikova Yu.V., Chubarov V.M., Shabanova E.V., 2022. Centre of Isotopic and Geochemical Research (IGC SB RAS): Current State of Micro- and Macroanalysis. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (2), 0585 (in Russian) [Скузоватов С.Ю., Белозерова О.Ю., Васильева И.Е., Зарубина О.В., Канева Е.В., Сокольникова Ю.В., Чубаров В.М., Шабанова Е.В. Центр коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН: Современное состояние методов изучения вещества на микро- и макроуровне // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13. № 2. 0585]. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0585>.

Sláma J., Košler J., Condon D.J., Crowley J.L., Gerdes A., Hanchar J.M., Horstwood M.S.A., Morris G.A. et al., 2008. Plešovice Zircon – A New Natural Reference Material for U-Pb and Hf Isotopic Microanalysis. *Chemical Geology* 249 (1–2), 1–35. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.11.005>.

Stacey J.S., Kramers I.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).

Stern R.A., 2001. A New Isotopic and Trace-Element Standard for the Ion Microprobe: Preliminary Thermal Ionization Mass Spectrometry (TIMS) U-Pb and Electron-Microprobe Data. In: *Current Research 2001-F1. Geological Survey of Canada*, 10. <https://doi.org/10.4095/212668>.

Stern R.A., Bodorkos S., Kamo S.L., Hickman A.H., Corfu F., 2009. Measurement of SIMS Instrumental Mass Fractionation of Pb Isotopes During Zircon Dating. *Geostandards and Geoanalytical Research* 33 (2), 145–168. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2009.00023.x>.

Vermeesch P., 2018. IsoplotR: A Free and Open Toolbox for Geochronology. *Geoscience Frontiers* 9 (5), 1479–1493. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.04.001>.

Votyakov S.L., Chervyakovskaya M.V., Shchapova Yu.V., Pankrushina E.A., Mikhalevsky G.B., Chervyakovsky V.S., 2022. Cathodoluminescence and Raman Spectroscopy as a Basis for the Selection of Reference Samples for LA-ICP-MS Analysis of Zircon. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (2), 0603 (in Russian) [Вотьяков С.Л., Червяковская М.В., Щапова Ю.В., Панкрушина Е.А., Михалевский Г.Б., Червяковский В.С. Катодолюминесценция и спектроскопия комбинационного рассеяния света как основа для выбора референсных образцов при ЛА-ИСП-МС анализе циркона // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13. № 2. 0603]. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2s-0603>.

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

Wika S., Martyanova G.N., Snytko V.A., Szczypek T., 1999. Sandy Bay (Bukhta Peschanaya) on Lake Baikal (Blow-Out Sands and Their Surrounding). Sochava Institute of

Geography SB RAS, Irkutsk, 60 p. (in Russian) [Вика С., Мартьянова Г.Н., Снытко В.А., Щипек Т. Бухта Песчаная на Байкале (развеваемые пески и их окружение). Иркутск: Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 1999. 60 с.].

Zaitceva M.V., Pupyshov A.A., Shchapova J.V., Votyakov S.L., 2016. Dating of Zircons Using NexION 300S Quadrupole Mass Spectrometer with Inductively Coupled Plasma and NWR 213 Attachment for Laser Ablation. *Analytics and Control* 20 (4), 294–306 (in Russian) [Зайцева М.В., Пупышев А.А., Щапова Ю.В., Вотьяков С.Л. U-Pb датирование цирконов с помощью квадрупольного масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой NexION 300S и приставки для лазерной абляции NWR 213 // Аналитика и контроль. 2016. Т. 20. No 4. С. 294–306]. <https://doi.org/10.15826/analitika.2016.20.4.006>.

Zhang L.-L., Zhu D.-C., Wang Q., Zhao Z.-D., Liu D., Xie J.-C., 2019. Late Cretaceous Volcanic Rocks in the Sangri Area, Southern Lhasa Terrane, Tibet: Evidence for Oceanic Ridge Subduction. *Lithos* 326–327, 144–157. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.12.023>.