



U-Pb LA-ICP-MS DATING OF DETRITAL ZIRCON FROM UPPER PERMIAN SANDSTONE OF THE BOYEVAYA GORA SECTION (ORENBURG REGION, SOUTHERN CIS-URALS)

A.V. Chistyakova ¹✉, A.V. Ivanov ², N.V. Bryanskiy^{2,3}, R.V. Veselovskiy ^{1,4}, T.I. Golovanova⁵, V.K. Golubev⁶

¹ Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, Moscow 119991, Russia

² Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 128 Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia

³ Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1a Favorsky St, Irkutsk 664033, Russia

⁴ Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 10-1 Bolshaya Gruzinskaya St, Moscow 123242, Russia

⁵ Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, 35 Staromonetny Ln, Moscow 119017, Russia

⁶ Borissiak Paleontological Institute, Russian Academy of Sciences, 123 Profsoyuznaya St, Moscow 117647, Russia

ABSTRACT. The first results of U-Pb LA-ICP-MS dating of 150 detrital zircon grains from the Upper Permian sandstone of the Boyevaya Gora section (Orenburg region, the Southern Cis-Urals) are presented. 95 conditional zircon U-Pb isotopic dates form two age peaks – 381 and 529 Ma. It is assumed that clastic material entered the sedimentation basin mainly due to erosion of the Early Hercynian Ural complexes and relics of the Protouralian-Timanian orogen.

KEYWORDS: detrital zircon; U-Pb LA-ICP-MS dating; Upper Permian; East European Platform; Southern Cis-Urals

FUNDING: This study is financially supported by megagrant 075-15-2019-1883 (Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation) and grant 22-27-00597 (Russian Science Foundation). Laboratory studies were carried out on the equipment of Shared Research Facilities: "Geodynamics and Geochronology" at the Institute of the Earth's Crust SB RAS (grant 075-15-2021-682), "Petrophysics, Geomechanics and Paleomagnetism" at the Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, "IGEM-analytics" at the Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS, "Analytical studies of the Earth early history" at the Institute of Precambrian Geology and Geochronology RAS.

SHORT COMMUNICATION

Received: December 30, 2021

Revised: February 7, 2022

Correspondence: Alvina V. Chistyakova, alvina.tch@gmail.com

Accepted: February 16, 2022

FOR CITATION: Chistyakova A.V., Ivanov A.V., Bryanskiy N.V., Veselovskiy R.V., Golovanova T.I., Golubev V.K., 2022. U-Pb LA-ICP-MS Dating of Detrital Zircon from Upper Permian Sandstone of the Boyevaya Gora Section (Orenburg Region, Southern Cis-Urals). *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (2s), 0600. doi:10.5800/GT-2022-13-2s-0600

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ U-Pb LA-ICP-MS ДАТИРОВАНИЯ ОБЛОМОЧНОГО ЦИРКОНА ИЗ ВЕРХНЕПЕРМСКИХ ПЕСЧАНИКОВ РАЗРЕЗА БОЕВАЯ ГОРА (ОРЕНБУРГСКАЯ ОБЛАСТЬ, ЮЖНОЕ ПРЕДУРАЛЬЕ)

А.В. Чистякова¹, А.В. Иванов², Н.В. Брянский^{2,3}, Р.В. Веселовский^{1,4}, Т.И. Голованова⁵, В.К. Голубев⁶

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия

² Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

³ Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия

⁴ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Россия

⁵ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, 119017, Москва, пер. Старомонетный, 35, Россия

⁶ Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка РАН, 117647, Москва, ул. Профсоюзная, 123, Россия

АННОТАЦИЯ. Представлены первые результаты U-Pb LA-ICP-MS датирования 150 зерен обломочного циркона из песчанников терминальной перми разреза Боевая Гора (Оренбургская область, Южное Предуралье). В полученном по 95 кондиционным оценкам изотопного возраста распределении отчетливо доминирует палеозойская популяция с двумя максимумами – 381 и 529 млн лет. Предполагается, что обломочный материал поступал в бассейн осадконакопления главным образом за счет эрозии как раннегерцинских комплексов Уральского орогена, так и реликтов Протуральско-Тиманского складчатого сооружения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: обломочный (детритовый) циркон; U-Pb LA-ICP-MS датирование; верхняя пермь; Южное Предуралье; Восточно-Европейская платформа

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследования выполнены при поддержке мегагранта Минобрнауки РФ № 075-15-2019-1883 и гранта РНФ №22-27-00597. Лабораторные исследования проведены на оборудовании ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН (№ 075-15-2021-682), ЦКП «Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм» ИФЗ РАН, ЦКП «ИГЕМ-аналитика» ИГЕМ РАН и ЦКП «Аналитические исследования ранней истории Земли» ИГГД РАН.

1. ВВЕДЕНИЕ

Сведения о распределении U-Pb изотопных возрастов зерен обломочного циркона крайне информативны при детальном палеогеографических и палеотектонических реконструкциях. U-Pb LA-ICP-MS датирование циркона оказалось очень эффективным в контексте расшифровки условий и особенностей формирования осадочных бассейнов Западного Урала для всего рифей-палеозойского интервала [Kuznetsov, Romanyuk, 2021; Maslov et al., 2016; и ссылки в данных работах]. Однако пермские комплексы зоны сочленения Восточно-Европейской платформы и Урала до сих пор слабо охарактеризованы в этом отношении: это единичные пробы из нижнепермских интервалов разрезов Полярного [Kuznetsov et al., 2013] и Южного Урала (Кузнецов Н.Б., л/с), а также две пробы из верхнепермских отложений татарского отдела Бельской впадины (Кузнецов Н.Б., л/с; [Maslov et al., 2016]), одна из которых представлена лишь 19 кондиционными оценками изотопного возраста циркона [Maslov et al., 2016]. Таким образом, очевидна актуальность накопления более обширной фактологической базы для пермских толщ Предуралья, при этом особо перспективной для изучения зерен обломочного циркона представляется терминальная пермь Оренбургской области.

2. МЕТОДИКА АНАЛИЗА И ОБРАЗЦЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом настоящего исследования стал разрез Боевая Гора – один из наиболее представительных

пограничных пермско-триасовых разрезов Южного Предуралья. Разрез расположен приблизительно в 50 км к югу от Оренбурга в овраге Корольки, прорезающем правый берег р. Елшанка в 1.5 км севернее с. Боевая Гора Соль-Илецкого района Оренбургской области. Здесь хорошо представлены как породы верхней перми (верхневятский подъярус), так и нижнетриасовый стратиграфический интервал (вохминский горизонт) [Taylor et al., 2009; Surkov et al., 2009]. Проба для датирования обломочного циркона была отобрана в точке с координатами 51°18.039' с.ш., 54°54.240' в.д. из слоя плотных зеленовато-серых мелкосреднезернистых песчанников, приблизительно в 25 м ниже предполагаемой границы перми и триаса [Surkov et al., 2009].

Выделение зерен обломочного циркона по классическому алгоритму (с использованием электромагнитной сепарации и разделения в тяжелых жидкостях), а также интегрирование 150 зерен в эпоксидную шашку проводились в Минералогической сепарационной лаборатории ИГГД РАН (г. Санкт-Петербург). Особенности морфологии, а также внутреннего строения циркона анализировались с помощью прямого оптического микроскопа Olympus BX53M в ИФЗ РАН (г. Москва) и цветных катодолюминесцентных изображений, полученных на базе электронно-зондового микроанализатора Cameca MS-46 в ИГЕМ РАН (г. Москва). Изотопное U-Pb LA-ICP-MS датирование было реализовано в ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН (г. Иркутск) с использованием масс-спектрометра Agilent 7900 и системы лазерной абляции Analyte Excite,

Таблица 1. Результаты измерений стандартных образцов циркона**Table 1.** Results of measurements of the zircon reference standards

Стандарт	Возраст, аттестованный методом TIMS, млн лет	Возраст, полученный в этой работе методом LA-ICP-MS, млн лет
91500 [1]	1065.4±0.3	1066.6±7.6
GJ1 [2]	601.9±0.4	597.5±5.4
R33 [3]	419.26±0.39	421.6±2.6

Примечание. Ссылки на данные по стандартам: 1 – [Wiedenbeck et al., 1995], 2 – [Horstwood et al., 2016], 3 – [Black et al., 2004]. Ошибки приведены на уровне 2σ.

Note. References for age of the standards: 1 – [Wiedenbeck et al., 1995], 2 – [Horstwood et al., 2016], 3 – [Black et al., 2004]. Errors are 2σ.

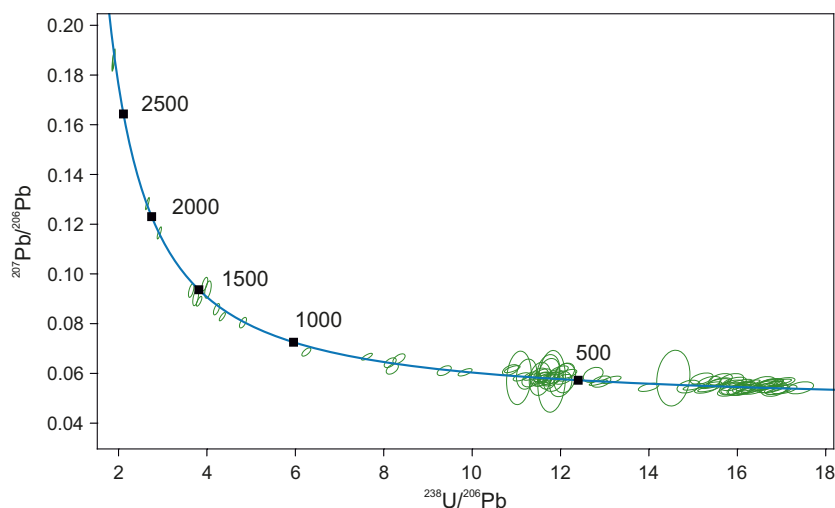


Рис. 1. Диаграмма Тера-Вассербурга для 95 зерен циркона с дискордантностью в пределах –3 % ... +5 %.

Fig. 1. Tera-Wasserburg plot for 95 zircon grains with discordance less than –3 % ... +5 %.

диаметр пятна лазера составлял 35 мкм. Расчет возраста осуществлялся относительно стандарта циркона Plešovice с возрастом 337.13±0.37 млн лет [Sláma et al., 2008]. С целью контроля качества производимых измерений и для калибровки во время сессии систематически использовались стандарты циркона Harvard 91500, GJ1 и R33. Для каждого циркона-стандарта были получены конкордантные оценки возраста, согласующиеся с результатами датирования методом ID-TIMS (табл. 1). Расчет изотопных отношений проводился в программе Iolite 4.0 [Paton et al., 2011], а построение диаграммы с конкордией, фильтрация, статистическая обработка данных – в программе Dezirteer [Powerman et al., 2021]. Всего было проанализировано 150 зерен циркона (Прил. 1, табл. 1.1), из которых фильтр по дискордантности (3 % – отрицательная и 5 % – положительная) прошли 95 зерен. Эти зерна показаны на диаграмме Тера-Вассербурга (рис. 1). Они же использовались для построения диаграммы вероятностного распределения – PDP (рис. 2).

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

В результате U-Pb LA-ICP-MS датирования зерен обломочного циркона из верхнепермских песчаников разреза Боевая Гора был получен возрастной спектр, представленный на рис. 2. В наблюдаемом распределении

возрастов доминирующую роль (68 %) играют палеозойские зерна при подчиненном значении более древних популяций. При этом наиболее отчетливо выделяется позднедевонский возрастной максимум (381 млн лет), а также кембрийский пик с модальным значением 529 млн лет. Исследуемый циркон представлен слабоили полуокатанными зернами размером 100–200 мкм. Данные анализа цветных катодолюминесцентных изображений показывают (рис. 2), что большинство зерен обладает выраженной эвгдральной зональностью и желтой окраской. Однако палеозойская популяция содержит и значительное количество темного в катодолюминесценции циркона, сочетающего желтые и серые или голубые и серые цвета. Субпопуляции с возрастными максимумами 381 и 529 млн лет соответственно весьма схожи по морфоструктурным признакам, однако доля зерен с менее выраженной зональностью и, в целом, с более сложным внутренним строением заметно выше для группы с кембрийскими возрастными максимумами. Все зерна циркона древнее 900 млн лет характеризуются серо-голубыми оттенками CL-изображений.

На основании полученных оценок изотопного возраста (рис. 2) мы предполагаем, что основными источниками кластического материала могли служить как кристаллические комплексы Уралид среднего и кислото состава, широко развитые на уровне современного

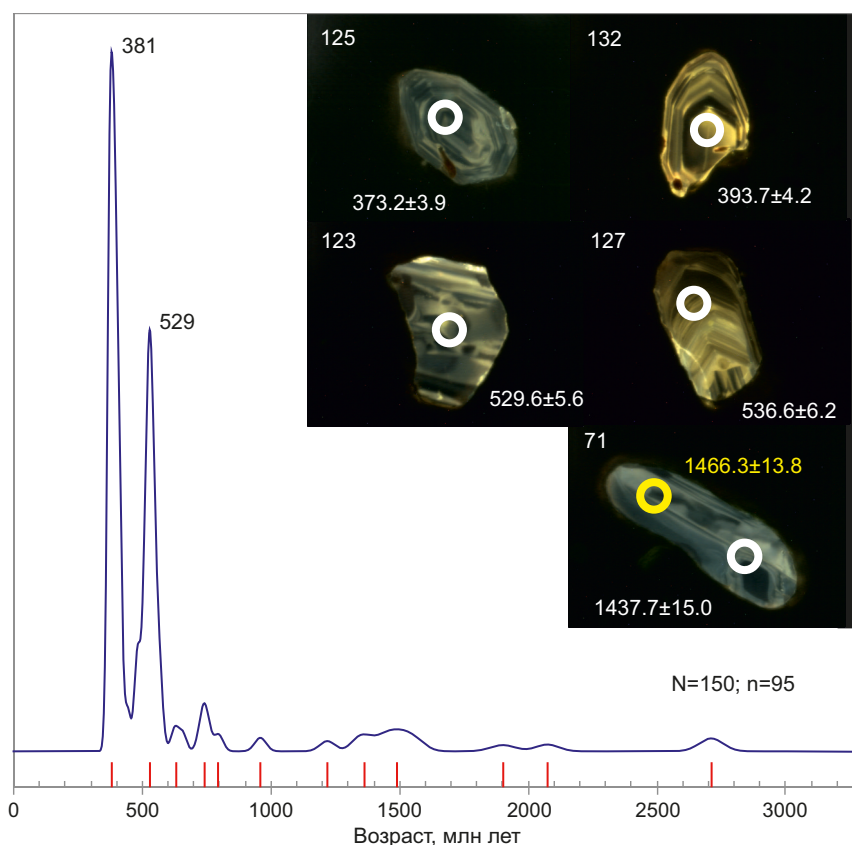


Рис. 2. Распределение возрастов зерен обломочного циркона (probability density plot) из верхнепермских песчаников разреза Боевая Гора.

N – общее количество проанализированных зерен; n – количество оценок U-Pb возраста с дискордантностью менее –3 % ... +5 %. Числами обозначены максимумы основных возрастных групп (млн лет). На врезках – катодоллюминесцентные изображения некоторых зерен с отмеченными номерами, точками анализа и полученными оценками возраста.

Fig. 2. Distribution of U-Pb dates of detrital zircon (probability density plot) from the Boyevaya Gora Upper Permian sandstone.

N – the total number of analyzed grains; n – the number of grains, having discordance less than –3 % ... +5 %. The main age peaks are indicated. The sidebar shows CL images with the values of U-Pb date and pits of analysis.

эрозионного среза, так и реликты Протоуральско-Тиманского орогена, в настоящее время фактически отсутствующие в пределах региона [Puchkov, 2010; Kuznetsov et al., 2013]. Присутствие немногочисленных зерен протерозойского возраста может быть следствием переотложения более древних, например рифей-вендских, терригенных толщ [Kuznetsov et al., 2021].

Следует также отметить, что полученный спектр U-Pb возрастов циркона песчаников терминальной перми разреза Боевая Гора кардинально отличается от спектра для зерен циркона вязовской свиты верхней перми Бельской впадины (Кузнецов Н.Б., л/с), хотя расстояние между двумя точками отбора составляет всего около 140 км. Этот факт может указывать на сложную и/или нестабильную палеогеографическую и палеотектоническую обстановку формирования позднепермских моласс южной части Западного Приуралья.

4. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю признательность К.Г. Ерофеевой (ИГЕМ РАН), а также глубоко благодарны

А.Е. Марфину (ИЗК СО РАН) за помощь в проведении аналитических исследований и ценные консультации.

5. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

6. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов. Все авторы прочитали рукопись и согласны с опубликованной версией.

The authors have no conflicts of interest to declare. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

7. 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>.

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>.

Kuznetsov N.B., Gorozhanin V.M., Gorozhanina E.N., Romanyuk T.V., Belousova E.A., Sysoeva A.O., Dubensky A.S., Sheshukov V.S., Lyapunov S.M., 2021. U-Pb Age of Grains of Detrital Zircon from Clastic Rocks of the Bakeevskaya Formation (Lower Stratigraphic Element of the Composite Section of the Asha Group) of the Bashkir Uplift (Southern Urals). In: *Geodynamic Evolution of the Lithosphere of the Central Asian Mobile Belt (from Ocean to Continent)*. Proceedings of Scientific Meeting (October 19–22, 2021). Iss. 19. IEC SB RAS, Irkutsk, p. 130–133 (in Russian) [Кузнецов Н.Б., Горожанин В.М., Горожанина Е.Н., Романюк Т.В., Белюсова Е.А., Сысоева А.О., Дубенский А.С., Шешуков В.С., Ляпунов С.М. U-Pb возраст зерен детритового циркона из обломочных пород bakeevской свиты (нижний стратиграфический элемент сводного разреза ашинской серии) Башкирского поднятия (Южный Урал) // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы научного совещания (19–22 октября 2021 г.). Иркутск: ИЗК СО РАН, 2021. Вып. 19. С. 130–133].

Kuznetsov N.B., Romanyuk T.V., 2021. Peri-Gondwanan Blocks in the Structure of the Southern and Southeastern Framing of the East European Platform. *Geotectonics* 55, 439–472. <https://doi.org/10.1134/s0016852121040105>.

Kuznetsov N.B., Soboleva A.A., Miller E.L., Udoratina O.V., Gehrels G., Romanyuk T.V., 2013. First U-Pb Datings of Detrital Zircons from Middle and Upper Paleozoic Sandstones of the Polar Urals: Testing the Regional Tectonic Models. *Doklady Earth Sciences* 451, 692–697. <https://doi.org/10.1134/S1028334X1307012X>.

Maslov A.V., Mizens G.A., Vovna G.M., Pyzhova E.S., Kuznetsov N.B., Kiselev V.I., Ronkin Yu.L., Bikbaev A.Z., Romanyuk T.V., 2016. Some General Features of the Western Urals Terrigenous Deposits Formation: Synthesis of U-Pb Isotopic Age Data of Detrital Zircon and Geochemical Investigation of the Sales and Mudstones. *Lithosphere* 3, 27–46 (in Russian) [Маслов А.В., Мизенс Г.А., Вовна Г.М., Пыжова Е.С., Кузнецов Н.Б., Киселев В.И., Ронкин Ю.Л., Бикбаев А.З., Романюк Т.В. О некоторых общих особенностях формирования терригенных отложений Западного Урала:

синтез данных изотопного U–Pb датирования обломочных цирконов и геохимических исследований глинистых пород // *Литосфера*. 2016. № 3. С. 27–46].

Paton Ch., Hellstrom J.C., Paul P., Woodhead J.D., Hergt J.M., 2011. Iolite: Freeware for the Visualisation and Processing of Mass Spectrometric Data. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 26, 2508–2518. <https://doi.org/10.1039/C1JA10172B>.

Powerman V.I., Buyantuev M., Ivanov A.V., 2021. A Review of Detrital Zircon Data Treatment, and Launch of a New Tool "Dezirteer" along with the Suggested Universal Workflow. *Chemical Geology* 583, 120437. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120437>.

Puchkov V.N., 2010. *Geology of the Urals and Cis-Urals (Topical Issues of Stratigraphy, Tectonics, Geodynamics and Metallogeny)*. DizaynPoligrafServis, Ufa, 280 p. (in Russian) [Пучков В.Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.].

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>.

Surkov M.V., Benton M., Twitchett R., Tverdokhlebov V.P., Newell E., Loy S., 2009. Traces of Large Therapsids in the Sediments of the Vyatka Horizon (Upper Permian) In the Southern Cis-Urals. In: M.A. Shishkin, V.P. Tverdokhlebov (Eds). *Studies in Paleontology and Biostratigraphy of Ancient Continental Deposits (In Memory of Professor V.G. Ochev)*. Nauchnaya Kniga, Saratov, p. 175–188 (in Russian) [Сурков М.В., Бентон М., Твитчетт Р., Твердохлебов В.П., Ньювелл Э., Лой С. Следы крупных терапсид в отложениях вятского горизонта (верхняя пермь) в Южном Предуралье // Исследования по палеонтологии и биостратиграфии древних континентальных отложений (памяти профессора В.Г. Очева) / Ред. М.А. Шишкин, В.П. Твердохлебов. Саратов: Научная книга, 2009. С. 175–188].

Taylor K.G., Tucker C., Twitchett R.J., Kearsley T., Benton M.J., Newell A.J., Surkov M.V., Tverdokhlebov V.P., 2009. Magnetostratigraphy of Permian/Triassic Boundary Sequences in the Cis-Urals, Russia: No Evidence for a Major Temporal Hiatus. *Earth and Planetary Science Letters* 281 (1–2), 36–47. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.02.002>.

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>.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 / APPENDIX 1

Таблица 1.1. Результаты U-Pb LA-ICP-MS датирования обломочного циркона из верхнепермских песчаников разреза Боевая Гора
Table 1.1. U-Pb LA-ICPMS dating results of a detrital zircon from the Upper Permian sandstones in the Boveyaya Gora cross-section

Номер анализа	Изотопные отношения						Возраст, млн лет					
	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ abs	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ abs	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ abs	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ abs	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ abs	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ abs
2	0.0630	0.0007	0.0539	0.0017	0.4683	0.0157	389.8	10.6	394.1	4.4	364.6	69.5
3	0.0848	0.0010	0.0531	0.0022	0.6204	0.0267	490.1	16.5	524.5	6.0	332.5	92.2
4	0.0882	0.0011	0.0576	0.0020	0.7000	0.0258	538.6	15.6	544.8	6.5	512.8	77.5
5	0.0590	0.0008	0.0599	0.0039	0.4873	0.0324	403.0	22.1	369.7	4.8	598.0	141.0
6	0.0596	0.0007	0.0561	0.0011	0.4611	0.0103	385.0	6.9	373.4	4.0	455.3	41.5
7	0.0501	0.0006	0.0704	0.0013	0.4864	0.0104	402.3	7.3	315.3	3.4	938.2	39.0
8	0.0654	0.0007	0.0537	0.0011	0.4842	0.0113	401.2	7.8	408.5	4.4	359.2	46.6
9	0.0900	0.0010	0.0586	0.0011	0.7267	0.0158	554.5	9.6	555.4	5.9	550.5	42.5
10	0.0904	0.0015	0.0582	0.0071	0.7253	0.0893	553.8	52.3	558.1	8.9	536.0	265.0
11	0.0848	0.0015	0.0568	0.0082	0.6635	0.0965	516.6	58.9	524.5	8.8	482.0	319.0
12	0.0827	0.0010	0.0605	0.0024	0.6895	0.0286	532.5	17.5	512.2	6.0	620.5	87.0
13	0.0671	0.0008	0.0547	0.0017	0.5061	0.0168	415.9	11.2	418.9	4.7	399.4	68.8
14	0.0645	0.0008	0.0496	0.0018	0.4410	0.0168	370.7	12.0	403.1	4.6	173.4	86.2
15	0.0619	0.0007	0.0541	0.0015	0.4611	0.0138	385.0	9.5	386.9	4.3	373.8	62.0
16	0.0624	0.0007	0.0533	0.0014	0.4580	0.0131	383.1	8.9	389.9	4.3	341.8	57.7
17	0.0844	0.0011	0.0567	0.0026	0.6598	0.0313	514.7	19.0	522.5	6.2	480.0	100.0
18	0.2671	0.0031	0.0904	0.0021	3.3271	0.0863	1487.0	20.2	1525.8	15.7	1432.1	44.1
19	0.0635	0.0007	0.0585	0.0020	0.5119	0.0185	419.5	12.1	396.8	4.5	546.4	72.9
20	0.0591	0.0006	0.0529	0.0009	0.4307	0.0087	363.4	6.3	370.0	3.9	321.8	40.0
21	0.0901	0.0010	0.0534	0.0011	0.6628	0.0154	516.4	9.5	555.9	5.8	345.2	47.0
22	0.1228	0.0014	0.0643	0.0013	1.0879	0.0250	747.4	12.0	746.4	7.8	750.2	41.7
23	0.0592	0.0007	0.0535	0.0013	0.4364	0.0116	367.6	8.1	370.7	4.0	348.2	53.7
24	0.0598	0.0006	0.0536	0.0009	0.4414	0.0087	371.2	6.1	374.2	3.9	352.8	37.1
25	0.0737	0.0009	0.0501	0.0017	0.5091	0.0182	417.6	12.3	458.6	5.1	196.7	78.9
26	0.0818	0.0015	0.0443	0.0081	0.4995	0.0918	411.7	61.9	507.0	9.1	0.0	415.1
27	0.0627	0.0007	0.0565	0.0013	0.4885	0.0125	404.2	8.5	392.3	4.2	472.6	50.9
28	0.0598	0.0007	0.0509	0.0015	0.4193	0.0132	355.7	9.6	374.2	4.1	236.2	69.3
29	0.0917	0.0010	0.0617	0.0009	0.7797	0.0145	585.3	8.3	565.5	5.8	663.1	32.6
30	0.2616	0.0028	0.0890	0.0013	3.2085	0.0582	1458.9	13.8	1497.9	14.4	1402.7	27.3
32	0.0885	0.0013	0.0817	0.0050	0.9964	0.0627	701.9	31.8	546.6	7.6	1237.0	120.0
33	0.0863	0.0010	0.0584	0.0013	0.6945	0.0172	535.6	10.3	533.6	5.6	544.6	48.3
34-1	0.0932	0.0018	0.0517	0.0099	0.6641	0.1278	516.9	77.7	574.5	10.9	270.0	438.0
34-2	0.0833	0.0011	0.0558	0.0034	0.6404	0.0400	502.9	24.8	515.7	6.8	445.0	135.0
35	0.0620	0.0007	0.0519	0.0010	0.4435	0.0097	372.7	6.8	388.0	4.1	278.7	43.7
36	0.1312	0.0014	0.0667	0.0009	1.2064	0.0207	803.5	9.5	794.8	7.9	827.8	28.1
37	0.0778	0.0008	0.0563	0.0008	0.6037	0.0103	479.6	6.5	483.0	4.9	463.2	29.5
38	0.0629	0.0007	0.0538	0.0015	0.4663	0.0140	388.4	9.8	393.2	4.3	360.0	63.8
39	0.2077	0.0023	0.0804	0.0014	2.3012	0.0473	1212.5	14.3	1216.4	12.1	1205.4	33.6
40	0.0611	0.0007	0.0535	0.0008	0.4509	0.0084	377.9	5.9	382.4	4.0	350.7	34.6
41	0.0616	0.0007	0.0543	0.0010	0.4612	0.0096	385.1	6.7	385.3	4.0	384.2	40.1
42	0.0632	0.0007	0.0528	0.0013	0.4601	0.0124	384.3	8.5	395.2	4.2	319.2	54.7
43	0.0617	0.0007	0.0529	0.0009	0.4499	0.0091	377.2	6.4	385.8	4.0	324.8	39.0
44	0.1600	0.0017	0.0686	0.0011	1.5130	0.0292	935.5	11.4	956.9	9.6	885.2	31.7
45	0.0585	0.0007	0.0499	0.0019	0.4025	0.0160	343.4	11.3	366.7	4.1	188.8	86.3
46	0.0622	0.0007	0.0534	0.0015	0.4579	0.0139	382.5	9.8	389.1	4.3	342.7	64.9
47	0.0860	0.0011	0.0478	0.0034	0.5665	0.0410	455.6	26.5	531.8	6.7	87.3	168.2
48	0.0650	0.0007	0.0565	0.0015	0.5067	0.0146	415.9	10.0	406.4	4.5	469.1	60.0
49	0.0567	0.0006	0.0819	0.0014	0.6395	0.0130	501.9	8.1	355.3	3.8	1241.5	34.0
50	0.2371	0.0026	0.0858	0.0015	2.8040	0.0579	1356.5	15.3	1371.8	13.6	1332.6	33.4

Таблица 1.1. (продолжение)

Table 1.1. (continued)

Номер анализа	Изотопные отношения						Возраст, млн лет					
	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ abs	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ abs	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ abs	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ abs	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ abs	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ abs
51	0.0845	0.0010	0.0618	0.0020	0.7194	0.0248	550.4	14.8	522.8	5.9	666.6	70.0
52	0.0859	0.0012	0.0558	0.0031	0.6603	0.0378	514.6	23.0	531.0	7.0	443.0	123.0
53	0.0606	0.0007	0.0581	0.0010	0.4852	0.0098	401.6	6.9	379.3	4.0	532.2	38.8
54	0.0720	0.0010	0.0496	0.0033	0.4922	0.0334	406.1	22.4	448.2	5.7	173.0	153.0
55	0.0835	0.0013	0.0535	0.0053	0.6154	0.0617	486.9	38.8	516.8	7.5	349.0	224.0
56	0.0951	0.0014	0.0931	0.0055	1.2198	0.0743	809.5	33.8	585.5	8.4	1488.0	111.0
57	0.0836	0.0013	0.0682	0.0052	0.7854	0.0611	588.8	34.7	517.3	7.6	875.0	158.0
58	0.0870	0.0013	0.1070	0.0056	1.2828	0.0698	838.1	31.0	537.7	7.7	1748.1	95.8
59	0.0863	0.0010	0.0586	0.0013	0.6970	0.0173	536.8	10.5	533.6	5.7	550.5	49.6
60	0.0620	0.0007	0.0554	0.0009	0.4731	0.0090	393.3	6.2	387.6	4.0	427.0	35.0
61	0.0614	0.0007	0.0516	0.0010	0.4366	0.0097	367.5	6.9	384.1	4.1	264.5	44.5
62	0.0862	0.0009	0.0565	0.0011	0.6711	0.0150	521.6	9.0	533.0	5.6	471.9	42.3
63	0.0739	0.0009	0.0624	0.0027	0.6351	0.0286	499.2	18.0	459.3	5.5	686.5	93.7
64	0.0598	0.0007	0.0562	0.0010	0.4635	0.0097	386.5	6.8	374.7	4.0	457.7	40.3
65	0.0863	0.0010	0.0597	0.0014	0.7096	0.0185	544.3	11.2	533.3	5.8	590.3	52.0
66	0.0835	0.0009	0.0612	0.0012	0.7044	0.0158	541.6	9.7	517.0	5.5	646.4	43.5
67	0.0853	0.0012	0.0606	0.0046	0.7123	0.0551	545.8	32.3	527.6	7.4	623.0	162.0
68	0.0861	0.0011	0.0645	0.0031	0.7655	0.0381	576.9	21.8	532.6	6.6	755.0	101.0
69	0.0867	0.0010	0.0575	0.0012	0.6868	0.0162	531.0	9.7	535.8	5.6	510.5	45.5
70	0.0881	0.0009	0.0586	0.0009	0.7113	0.0131	545.5	7.8	544.4	5.6	550.2	32.8
71-1	0.2486	0.0030	0.0937	0.0023	3.2098	0.0879	1459.2	20.8	1431.0	15.6	1500.4	45.4
71-2	0.2531	0.0028	0.0959	0.0018	3.3450	0.0731	1491.4	17.0	1454.4	14.6	1544.4	35.1
72	0.0523	0.0006	0.0699	0.0011	0.5039	0.0096	414.5	6.4	328.7	3.4	925.1	31.4
73	0.0603	0.0007	0.0560	0.0018	0.4655	0.0159	388.2	10.9	377.6	4.3	451.8	70.2
74	0.0853	0.0011	0.0626	0.0026	0.7359	0.0319	560.2	18.7	527.7	6.3	694.7	88.5
75	0.0588	0.0007	0.0565	0.0012	0.4575	0.0110	382.4	7.6	368.1	4.0	469.9	46.6
76	0.0602	0.0007	0.0551	0.0012	0.4568	0.0112	381.9	7.9	376.6	4.1	414.1	49.9
78	0.0588	0.0006	0.0601	0.0010	0.4867	0.0093	402.7	6.4	368.1	3.8	605.8	34.2
79	0.0653	0.0007	0.0590	0.0015	0.5306	0.0148	432.5	9.7	407.5	4.5	567.6	54.9
80	0.0690	0.0007	0.0606	0.0010	0.5762	0.0109	462.0	7.1	430.3	4.5	623.0	33.8
82	0.0829	0.0009	0.0576	0.0013	0.6583	0.0166	513.7	10.3	513.6	5.5	514.4	50.7
83	0.0666	0.0007	0.0546	0.0009	0.5009	0.0095	412.3	6.5	415.6	4.3	393.6	35.4
84-1	0.5316	0.0057	0.1855	0.0026	13.5891	0.2392	2721.4	16.5	2748.0	23.8	2701.7	22.9
84-2	0.5281	0.0056	0.1865	0.0026	13.5739	0.2381	2720.6	16.5	2733.5	23.7	2711.1	22.8
85	0.0715	0.0008	0.0544	0.0011	0.5358	0.0123	435.9	8.1	445.0	4.7	388.3	45.0
86	0.2745	0.0031	0.0933	0.0018	3.5295	0.0787	1533.5	17.3	1563.6	15.5	1492.3	35.5
87	0.0867	0.0011	0.0822	0.0030	0.9820	0.0379	694.8	19.5	535.9	6.4	1250.1	71.9
88	0.0601	0.0007	0.0575	0.0015	0.4759	0.0135	395.4	9.1	375.9	4.1	510.9	56.2
89	0.0623	0.0007	0.0598	0.0013	0.5136	0.0125	420.8	8.6	389.7	4.2	594.6	48.6
90	0.0867	0.0012	0.0578	0.0044	0.6906	0.0534	533.1	32.3	535.9	7.2	521.0	168.0
91	0.0574	0.0007	0.0542	0.0016	0.4287	0.0136	362.2	9.5	359.7	4.0	378.4	65.2
92	0.0622	0.0007	0.0563	0.0009	0.4828	0.0091	400.0	6.2	389.2	4.1	462.8	34.3
93	0.0836	0.0010	0.0550	0.0026	0.6340	0.0310	498.5	19.0	517.8	6.1	411.0	104.0
94	0.0599	0.0007	0.0664	0.0013	0.5478	0.0124	443.6	8.1	374.8	4.1	818.1	40.9
95	0.0597	0.0007	0.0558	0.0014	0.4593	0.0126	383.7	8.8	374.0	4.1	442.6	56.2
96	0.0774	0.0009	0.0567	0.0015	0.6049	0.0174	480.1	11.1	480.6	5.2	477.7	58.9
97	0.3422	0.0037	0.1165	0.0016	5.4947	0.0962	1899.6	15.2	1897.4	17.9	1901.9	25.1
98	0.0643	0.0007	0.0565	0.0009	0.5004	0.0098	412.0	6.6	401.5	4.2	470.7	36.0
99	0.0640	0.0007	0.0575	0.0016	0.5073	0.0152	416.4	10.1	400.0	4.4	507.9	60.5
100	0.0597	0.0006	0.0553	0.0009	0.4549	0.0089	380.7	6.2	373.6	3.9	424.2	36.3
101	0.0879	0.0013	0.0557	0.0045	0.6749	0.0554	523.3	33.8	543.2	7.4	437.0	181.0

Таблица 1.1. (продолжение)

Table 1.1. (continued)

Номер анализа	Изотопные отношения						Возраст, млн лет					
	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ abs	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ abs	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ abs	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ abs	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ abs	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ abs
102	0.0843	0.0010	0.0587	0.0018	0.6823	0.0223	527.9	13.2	522.0	5.8	553.5	65.5
103	0.0560	0.0006	0.0587	0.0011	0.4527	0.0098	379.0	7.0	351.0	3.7	553.9	42.0
104	0.0586	0.0007	0.0536	0.0012	0.4330	0.0108	365.4	7.8	367.2	4.0	354.5	51.4
105	0.0785	0.0009	0.0594	0.0020	0.6426	0.0229	503.7	13.9	487.2	5.4	579.3	71.7
106	0.0658	0.0007	0.0579	0.0015	0.5251	0.0148	428.5	9.6	410.9	4.4	524.2	54.9
107	0.0615	0.0007	0.0562	0.0008	0.4761	0.0084	395.4	5.8	384.9	4.0	457.3	31.6
108	0.0611	0.0007	0.0534	0.0012	0.4499	0.0112	377.0	7.6	382.5	4.1	343.1	48.8
109	0.0652	0.0007	0.0538	0.0008	0.4833	0.0089	400.4	6.1	406.9	4.2	362.9	33.9
110	0.3768	0.0040	0.1283	0.0016	6.6622	0.1093	2067.4	14.7	2061.2	18.8	2073.5	22.5
111	0.2300	0.0024	0.0828	0.0011	2.6242	0.0445	1307.5	12.2	1334.3	12.7	1263.9	25.0
112	0.0890	0.0010	0.0562	0.0016	0.6894	0.0211	532.3	12.7	549.7	6.0	458.5	63.2
113	0.0874	0.0011	0.0482	0.0025	0.5802	0.0309	464.4	19.6	539.9	6.3	107.0	121.0
114	0.0502	0.0006	0.0570	0.0020	0.3943	0.0146	337.6	10.5	315.8	3.6	490.9	76.6
115	0.0827	0.0011	0.0581	0.0039	0.6620	0.0453	515.9	27.7	512.1	6.6	533.0	147.0
116	0.0851	0.0011	0.0552	0.0031	0.6474	0.0373	506.5	22.9	526.5	6.4	417.0	125.0
117	0.0760	0.0008	0.0574	0.0010	0.6013	0.0122	478.0	7.8	472.3	4.9	505.6	38.0
118	0.0594	0.0007	0.0538	0.0020	0.4404	0.0172	370.7	12.1	372.0	4.2	362.5	83.8
119	0.0822	0.0009	0.0598	0.0012	0.6774	0.0155	525.5	9.6	509.2	5.4	596.8	44.9
120	0.0626	0.0007	0.0624	0.0012	0.5387	0.0119	437.7	7.8	391.7	4.1	687.6	40.3
121	0.0846	0.0012	0.0477	0.0050	0.5558	0.0588	448.9	38.5	523.2	7.3	83.8	249.6
122	0.1067	0.0012	0.0611	0.0013	0.8988	0.0216	651.1	11.8	653.8	7.0	641.8	47.2
123	0.0856	0.0009	0.0581	0.0013	0.6856	0.0171	530.4	10.2	529.6	5.6	534.1	48.6
124	0.0604	0.0007	0.0545	0.0010	0.4530	0.0096	379.4	6.7	377.8	4.0	389.5	40.8
125	0.0596	0.0006	0.0536	0.0009	0.4408	0.0091	370.8	6.4	373.4	3.9	355.0	39.6
126	0.1016	0.0011	0.0604	0.0010	0.8465	0.0164	622.7	9.0	623.9	6.3	618.4	35.0
127	0.0868	0.0010	0.0585	0.0024	0.6997	0.0299	538.7	17.8	536.5	6.2	547.9	89.2
128	0.0681	0.0008	0.0529	0.0012	0.4965	0.0125	409.0	8.7	424.7	4.5	321.3	52.9
129	0.1221	0.0014	0.0618	0.0014	1.0395	0.0262	723.6	12.8	742.4	7.8	665.9	47.5
130	0.0840	0.0010	0.0555	0.0024	0.6425	0.0288	504.1	17.9	520.0	6.0	432.6	96.7
131	0.0569	0.0007	0.0591	0.0021	0.4631	0.0173	386.4	12.0	356.5	4.1	569.4	77.3
132	0.0630	0.0007	0.0552	0.0014	0.4789	0.0133	397.1	9.3	393.5	4.3	418.1	57.9
133	0.0590	0.0006	0.0564	0.0008	0.4587	0.0083	383.4	5.8	369.4	3.8	468.3	32.6
134	0.0849	0.0010	0.0572	0.0015	0.6690	0.0191	520.0	11.5	525.1	5.7	497.9	57.4
135	0.0641	0.0007	0.0564	0.0012	0.4982	0.0119	410.2	8.1	400.5	4.2	465.6	47.6
136	0.0848	0.0009	0.0588	0.0011	0.6875	0.0148	531.6	8.7	525.0	5.4	560.2	39.6
137	0.0802	0.0011	0.0617	0.0039	0.6821	0.0441	528.2	26.9	497.4	6.5	664.0	137.0
138	0.0848	0.0011	0.0645	0.0035	0.7537	0.0421	570.5	24.3	524.7	6.5	758.0	114.0
139	0.0918	0.0012	0.0524	0.0021	0.6627	0.0278	516.5	17.2	565.9	6.9	303.6	92.6
140	0.0890	0.0012	0.0597	0.0040	0.7326	0.0501	557.9	29.0	549.9	7.1	591.0	144.0
141	0.1198	0.0013	0.0659	0.0013	1.0883	0.0245	748.0	12.0	729.6	7.5	803.5	41.6
142	0.0474	0.0005	0.1018	0.0014	0.6653	0.0115	518.0	7.0	298.7	3.1	1657.1	25.3
143	0.0885	0.0010	0.0490	0.0018	0.5974	0.0230	475.6	14.2	546.5	6.0	146.8	83.8
144	0.0630	0.0007	0.0572	0.0018	0.4968	0.0166	409.4	11.3	394.0	4.4	497.5	69.7
145	0.0881	0.0011	0.0751	0.0032	0.9120	0.0405	658.4	21.8	544.4	6.6	1071.3	86.6
146	0.0852	0.0011	0.0607	0.0035	0.7123	0.0421	546.0	24.9	526.8	6.6	627.0	124.0
147	0.0687	0.0012	0.0581	0.0074	0.5503	0.0707	445.0	46.6	428.4	7.1	532.0	281.0
148	0.0649	0.0007	0.0553	0.0009	0.4943	0.0095	407.9	6.5	405.5	4.2	421.4	36.0
149	0.0597	0.0007	0.0865	0.0021	0.7116	0.0191	545.9	11.4	373.7	4.1	1349.4	47.3
150	0.0920	0.0010	0.0614	0.0014	0.7787	0.0197	584.4	11.3	567.5	6.0	650.6	49.3
151	0.0585	0.0006	0.0606	0.0014	0.4882	0.0125	403.6	8.4	366.2	3.9	623.4	49.1

Примечание. Аналитические исследования выполнены на оборудовании ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН (г. Иркутск).

Note. Analytical studies involved the equipment of the Shared Research Facilities "Geodynamics and Geochronology" IEC SB RAS (Irkutsk).