



**PROVENANCE OF THE PERMIAN-TRIASSIC RED BEDS
FROM THE EASTERN PART OF THE MOSCOW BASIN, EAST EUROPEAN PLATFORM:
U-Pb LA-ICP-MS AND RAMAN SPECTROSCOPY DETRITAL ZIRCON DATA**

A.V. Chistyakova ^{1,2,✉}, **R.V. Veselovskiy** ^{1,2}, **V.B. Khubanov** ³, **A.V. Ivanov** ⁴,
A.E. Marfin ⁴, **N.V. Bryanskiy**^{4,5}, **V.K. Golubev** ^{6,7}

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

² Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 10-1 Bolshaya Gruzinskaya St, Moscow 123242, Russia

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

⁴ Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 128 Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia

⁵ Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1a Favorovskiy St, Irkutsk 664033, Russia

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

⁷ Kazan Federal University, 18 Kremlyovskaya St, Kazan 420008, Russia

ABSTRACT. We present the first systematic results of U-Pb LA-ICP-MS dating of detrital zircons from 12 samples representing different stratigraphic levels of 5 sections of the Permian-Triassic rocks, located within the eastern part of the Moscow basin (syncline) – Zhukov ravine, Astashikha, Nedubrovo, Balebikha and Klykovo. It is shown that the accumulation of the Upper Permian and Lower Triassic terrigenous complexes occurred under the influence of competing sources with two contrasting provenance signals with Neoproterozoic (Vendian)-Paleozoic and Paleo-Mesoproterozoic ages. The identified provenance signal patterns were used to detail the correlation and stratigraphic subdivision of the Permian-Triassic terrigenous complex of the Moscow basin. Raman spectroscopy of detrital zircon, first applied to the Permian-Triassic rocks of the East European platform, made it possible to identify sedimentary complexes of a relatively older terrigenous basin as a separate source of zircons, which experienced superimposed thermal impact in the Vendian-Cambrian time (~500–600 Ma).

KEYWORDS: detrital zircon; U-Pb LA-ICP-MS dating; Raman spectroscopy; Permian; Triassic; East European platform

FUNDING: The study was supported by the RSF, grant 22-27-00597. The studies were carried out using the "Analytical Study of the Early History of the Earth" Shared Research Facilities (SRF) of the IPGG RAS (Saint Petersburg), "GeoSpectrum" SRF of the GIN SB RAS (Ulan-Ude), "Geodynamics and Geochronology" SRF of the IEC SB RAS (Irkutsk), "Petrophysics, Geomechanics and Paleomagnetism" SRF of the IEPH RAS (Moscow), and "IGEM-Analytics" SRF of the IGEM RAS (Moscow).



RESEARCH ARTICLE

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

Received: February 14, 2023

Revised: May 10, 2023

Accepted: May 12, 2023

FOR CITATION: Chistyakova A.V., Veselovskiy R.V., Khubanov V.B., Ivanov A.V., Marfin A.E., Bryanskiy N.V., Golubev V.K., 2023. Provenance of the Permian-Triassic Red Beds from the Eastern Part of the Moscow Basin, East European Platform: U-Pb LA-ICP-MS and Raman Spectroscopy Detrital Zircon Data. *Geodynamics & Tectonophysics* 14 (5), 0718. doi:10.5800/GT-2023-14-5-0718

Supplementary files: [Chistyakova_et_al_2023_Suppl_1.pdf](#), [Chistyakova_et_al_2023_Suppl_2.xlsx](#), [Chistyakova_et_al_2023_Suppl_3.pdf](#), [Chistyakova_et_al_2023_Suppl_4.pdf](#)

English version: see article page online

РЕКОНСТРУКЦИЯ ПИТАЮЩИХ ПРОВИНЦИЙ МОСКОВСКОГО БАСЕЙНА В ПЕРМСКО-ТРИАСОВОЕ ВРЕМЯ ПО ДАННЫМ U-Pb LA-ICP-MS ДАТИРОВАНИЯ И РАМАНОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ОБЛОМОЧНОГО ЦИРКОНА

А.В. Чистякова^{1,2}, Р.В. Веселовский^{1,2}, В.Б. Хубанов³, А.В. Иванов⁴,
А.Е. Марфин⁴, Н.В. Брянский^{4,5}, В.К. Голубев^{6,7}

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

² Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Россия

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

⁴ Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

⁵ Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия

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

⁷ Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Казань, ул. Кремлевская, 18, Россия

АННОТАЦИЯ. Приведены первые систематические результаты U-Pb LA-ICP-MS датирования зерен обломочного циркона из 12 проб, представляющих разные стратиграфические уровни пяти разрезов пород погранично-го пермско-триасового возраста, расположенных в пределах восточного борта Московской синеклизы, – Жуков овраг, Асташиха, Недуброво, Балебиха и Клыково. Показано, что накопление терригенных комплексов верхней перми и нижнего триаса происходило под влиянием конкурирующих источников сноса с двумя контрастными провенанс-сигналами – с венд-палеозойскими и палеомезопротерозойскими возрастными характеристиками. Установленные закономерности использованы для уточнения схем корреляции и стратиграфического расчленения пермско-триасового терригенного комплекса Русской плиты. Метод рамановской спектроскопии обломочного циркона, впервые примененный для пермско-триасовых пород Русской плиты, позволил идентифицировать в качестве отдельного источника сноса осадочные комплексы относительно более древнего терригенного бассейна, испытавшего наложенное термальное воздействие в венд-кембрийское время около 500–600 млн лет назад.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: обломочный (детритовый) циркон; U-Pb LA-ICP-MS датирование; спектроскопия комбинационного рассеяния; рамановская спектроскопия; пермь; триас; Русская плита

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследования выполнены при поддержке РФФ, грант 22-27-00597. Исследования проведены на оборудовании ЦКП «Аналитические исследования ранней истории Земли» ИГГД РАН (г. Санкт-Петербург), ЦКП «Геоспектр» ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ), ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН (г. Иркутск), ЦКП «Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм» ИФЗ РАН (г. Москва) и ЦКП «ИГЕМ-аналитика» ИГЕМ РАН (г. Москва).

1. ВВЕДЕНИЕ

На границе палеозоя и мезозоя произошла крупная геосистемная перестройка в масштабах всей планеты, нашедшая свое отражение и на Восточно-Европейской платформе [Lozovsky et al., 2016; Kuleshov et al., 2019]. Палеогеографические условия в ее границах в рассматриваемый интервал времени тесно связаны как с климатическими флуктуациями, так и с палеотектоническими аспектами. Эволюция Палеоуральского орогена, который испытал интенсивную реактивизацию на рубеже перми и триаса [Puchkov, 2010; Arefiev, 2016b], видится одним из ключевых факторов, определявших в то время снос осадочного вещества в бассейн Русской плиты.

Верхнепермско-нижнетриасовый комплекс Русской плиты доступен для изучения в многочисленных естественных обнажениях восточной и северо-восточной части Московской синеклизы (рис. 1). На рубеже палеозоя и мезозоя центральная и восточная часть

Восточно-Европейской платформы представляли собой обширную низменность со слаборасчлененным рельефом и нестабильным гидрологическим режимом, в пределах которой сформировались невыдержанные по латерали красноцветные и пестроцветные пачки песчаников, алевролитов и глин с горизонтами палеопочв, а также с маломощными прослоями сероцветных мергелей и известняков. Тонкая горизонтальная слоистость и высокая доля пелитовой фракции в описанных породах свидетельствуют о том, что осадконакопление происходило в условиях спокойной гидродинамики, однако в то же время равнина, покрытая мягкими илоподобными осадками, легко прорезалась руслами как постоянных, так и временных потоков. Таким образом, усиление либо сокращение стока даже с отдаленных возвышенностей, например с западных склонов Палеоуральского орогена, непосредственно влияло на характер осадконакопления [Ivakhnenko, 2001; Kiselev et al., 2012].

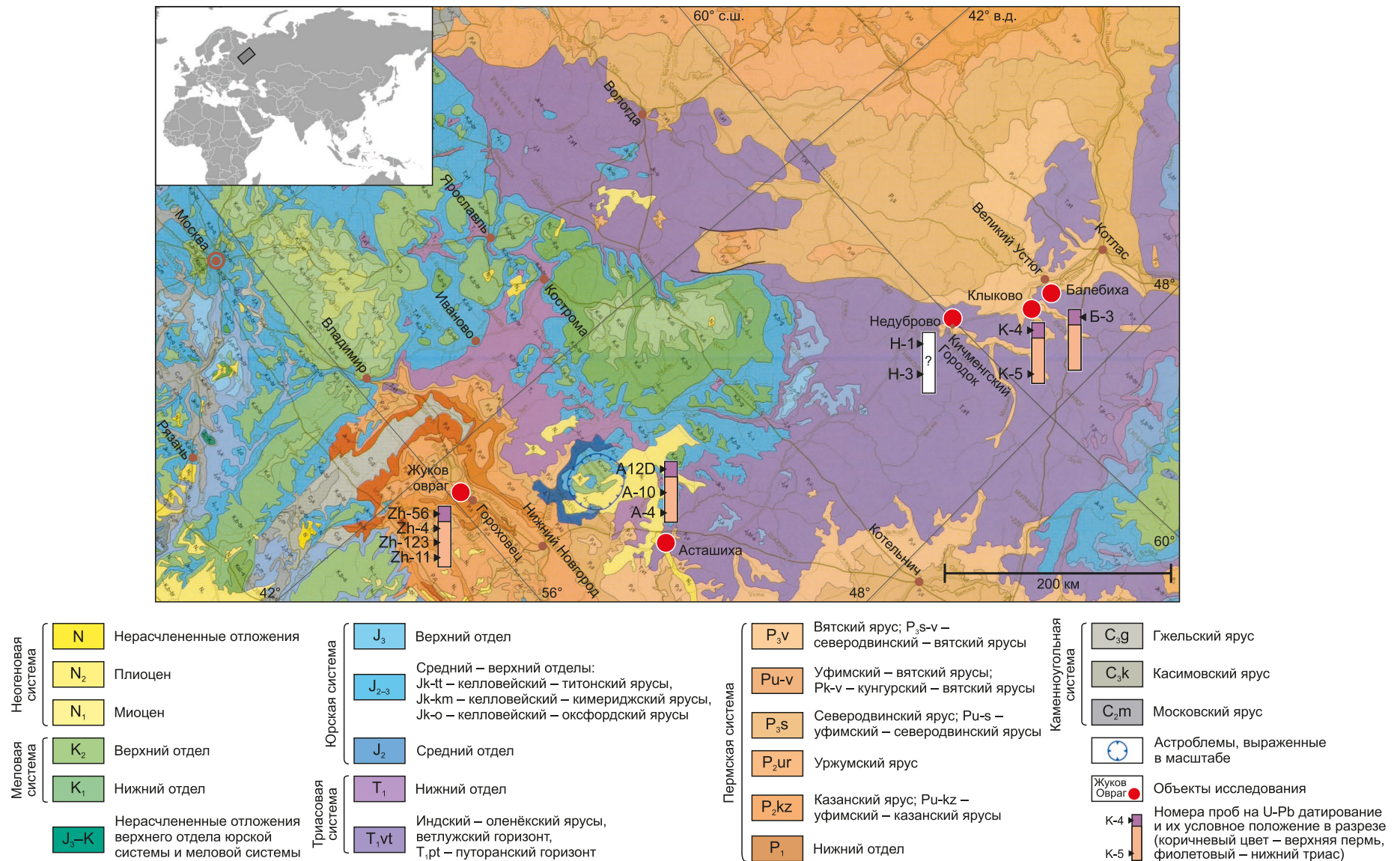


Рис. 1. Фрагмент геологической карты России и прилегающих акваторий масштаба 1:2500000 [Petrov, 2012] для территории Московской синеклизы с положением изученных разрезов. На врезке прямоугольником отмечен район исследований. Со схемой тектонического районирования Восточно-Европейской платформы можно ознакомиться в работе [Chistyakova et al., 2020].

Fig. 1. A fragment of the 1:2500000-scale geological map of Russia and adjacent water areas [Petrov, 2012] for the Moscow basin with the studied sections. Black rectangle in the inset shows the study area. See [Chistyakova et al., 2020] for a sketch tectonic map of the East European Platform.

В верхнепермских и нижнетриасовых континентальных комплексах Русской плиты прослеживается отчетливая цикличность [Arefiev, 2016a], которая, в первом приближении, выражена в литологическом составе пачек. Частая смена пород с окисными формами железа (красноцветные) и без них (голубовато-серые оттенки) фиксирует быстрые изменения условий среды осадконакопления, наиболее ярко выразившиеся в степени насыщенности кислородом. Подобный характер осадконакопления соответствует модели обширной аллювиальной низменности, почти полностью затопляемой в паводок и осушаемой в межень. Колебательные изменения в составе минералов тяжелой фракции установлены в работе [Strok, Trofimova, 1976], но первые детальные исследования на базе современной стратиграфической схемы были выполнены только для единичных разрезов [Arefiev et al., 2016b]. Выявленные закономерности отражают соперничество двух питающих провинций за область разгрузки. Вместе с тем анализ минералов тяжелой фракции допускает очень широкую вариативность интерпретации непосредственных источников сноса, особенно в случае преобладания гранат-цирконовой ассоциации [Lozovsky, Esaulova, 1998], а также их относительного вклада в общий объем обломочного материала.

Актуальной остается также проблема стратиграфического расчленения и корреляции континентальных пермско-триасовых толщ Восточно-Европейской платформы, которая определилась с самого начала их систематических исследований в начале XX в. Ввиду известных особенностей формирования континентальных осадочных толщ, таких как внутриформационные перерывы, латеральная фациальная изменчивость, отсутствие региональных литологических маркеров и многие другие, вопросы как глобальной, так и внутрибассейновой корреляции пермско-триасовых разрезов Русской плиты были и остаются предметом оживленных дискуссий, вследствие чего стратиграфическая схема пограничного пермско-триасового осадочного комплекса Восточно-Европейской платформы за последние десятилетия была неоднократно модернизирована [Golubev, 2016; Lozovsky, Novikov, 2016]. Активно применяемый в мировой практике метод реконструкции питающих провинций (источников сноса обломочного материала) осадочных бассейнов с использованием U-Pb датирования зерен обломочного (детритового) циркона является относительно новым и эффективным инструментом внутрибассейновой стратиграфической корреляции и восстановления палеогеографических обстановок, однако до недавнего времени подобные исследования для пермско-триасового комплекса центральной части Русской плиты не проводились. Выполненные авторами данной статьи в 2019 г. рекогносцировочные исследования для двух разрезов восточного борта Московской синеклизы – Жуков овраг и Недуброво – продемонстрировали принципиальную возможность применения данного метода для уточнения стратиграфической позиции разрезов,

имеющих спорный возраст [Chistyakova et al., 2020]. Таким образом, систематические исследования, направленные на идентификацию источников сноса и оценку их доли в общем объеме обломочного материала, поступавшего в Московский осадочный бассейн в поздней перми и раннем триасе, не только актуальны для реконструкции палеогеографических обстановок Восточно-Европейской платформы и ее обрамления в рассматриваемый временной интервал, но также могут быть использованы для решения задач стратиграфической корреляции и расчленения осадочных толщ.

Авторам работы [Resentini et al., 2020] удалось получить дополнительные характеристики питающих провинций обломочных пород нижнего мела в районе дельты р. Замбези (Южная Африка) с использованием метода рамановской спектроскопии (спектроскопия комбинационного рассеяния) зерен циркона. Указанная методика основана на зависимости степени метамиктности циркона от накопленной α -дозы излучения, которая, в свою очередь, зависит от возраста циркона и концентрации в нем U и Th. Степень метамиктности циркона находит количественное отражение в характеристиках рамановских спектров, в частности в положении пика $\nu_3(\text{SiO}_4)$, проявляющегося для зерен высокой степени кристалличности на уровне 1008 см^{-1} . Однако кристаллическая структура циркона может частично или полностью восстанавливаться в ходе простого термического отжига без участия флюидов [Nasdala et al., 2001]. В этом случае потеря радиогенного свинца необязательна, а степень метамиктности зерна может значительно отличаться от ожидаемой для соответствующего возраста, что дает возможность фиксировать наложенные низкотемпературные события, воздействовавшие на циркон после кристаллизации [Resentini et al., 2020]. Согласно экспериментальным данным [Härtel et al., 2021], смещение моды рамановского пика $\nu_3(\text{SiO}_4)$ происходит при температуре в диапазоне $330\text{--}370 \text{ }^\circ\text{C}$, однако авторы работы [Pidgeon, 2014] предполагают, что частичное восстановление кристалличности циркона без нарушения U-Pb изотопной системы может проходить и при более низкой температуре $\sim 130\text{--}320 \text{ }^\circ\text{C}$.

Настоящее исследование имеет своей главной целью актуализировать и детализировать существующие представления об источниках сноса обломочного материала в Московский осадочный бассейн в конце палеозоя – начале мезозоя, а также выявить динамику смены питающих провинций в масштабах восточного борта Московской синеклизы по результатам U-Pb датирования и рамановской спектроскопии зерен обломочного циркона в контексте получения дополнительных ограничений для региональной стратиграфической корреляции.

2. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Пограничные пермско-триасовые разрезы Русской плиты содержат множество явных и скрытых локальных перерывов, что предопределяет сохранение

противоречий при их стратиграфической корреляции. Однако для разреза Жуков овраг (Владимирская область) стратиграфическая непрерывность перехода верхнепермских отложений в триасовые достаточно надежно обоснована благодаря высокой информативности палеонтологических данных [Golubev, 2019], поэтому он считается опорным для пограничных пород перми и триаса не только Московской синеклизы, но и Восточно-Европейской платформы в целом [Golubev et al., 2012]. Данный разрез играет ключевую роль в проводимых исследованиях. Нами были также изучены четыре представительных пограничных пермско-триасовых разреза Русской плиты (рис. 1): Асташиха (Нижегородская область), Недуброво, Клыково и Балебиха (Вологодская область). Перечисленные разрезы разносторонне охарактеризованы современными литолого-палеонтологическими, палеомагнитными и изотопно-геохимическими данными [Lozovsky, Esaulova, 1998; Golubev et al., 2012; Arefiev et al., 2015, 2016a, 2016b, 2017; Lozovsky et al., 2016; Kuleshov et al., 2019; Fetisova et al., 2018, 2022].

Жуков овраг находится вблизи г. Гороховец (рис. 1) и прорезает крутой правый берег р. Клязьмы. Серия обнажений, расположенная в бортах оврага, формирует сводный разрез Жуков овраг мощностью свыше 45 м. Граница перми и триаса здесь традиционно отождествляется с подошвой вохминского горизонта. Четыре пробы для U-Pb датирования обломочного циркона были отобраны из слоев песчаников в нефедовском

(проба Zh-11), жуковском (пробы Zh-123 и Zh-4) и вохминском (проба Zh-56) горизонтах (табл. 1).

Разрез вблизи д. Асташиха расположен на правом берегу р. Ветлуга (рис. 1). Пробы для датирования зерен обломочного циркона были отобраны из трех различных уровней (табл. 1): из верхней части жуковского горизонта (проба А-4) и из вохминского горизонта (пробы А-10 и А12D). Граница перми и триаса в разрезе проведена по изотопно-геохимическим данным [Arefiev et al., 2017] между уровнями отбора А-10 и А12D.

Естественное обнажение пород Недуброво находится в пределах одноименной деревни на левом берегу р. Кичменьга. Особое значение коренные породы данного разреза, и в первую очередь надежное обоснование их возраста, приобрели вследствие обнаружения в них интервала аномальных палеомагнитных направлений [Fetisova et al., 2018]. К сожалению, результаты палеонтологических и изотопно-геохимических [Arefiev et al., 2015, 2017; Lozovsky et al., 2016; Kuleshov et al., 2019], а также магнитостратиграфических [Fetisova et al., 2018] исследований не позволяют с уверенностью позиционировать недубровские отложения в региональном разрезе: по биостратиграфическим и изотопно-геохимическим данным разрез Недуброво располагается в нижней части нижевохминского подгоризонта, а по магнитостратиграфическим данным – в нижней части жуковского горизонта (табл. 1) Пробы для датирования зерен обломочного циркона были

Таблица 1. Краткая характеристика отобранных образцов
Table 1. A brief description of the selected samples

| Разрез | Координаты (с.ш., в.д.) | Проба | № слоя | Описание |
|-----------------------|--------------------------|---------------------|---|--|
| Жуков овраг (опорный) | 56.179337° 42.641613° | Zh-56 | 7 (обнажение 1029) [Golubev et al., 2012] | Коричнево-серые мелко- и среднезернистые полимиктовые песчаники, неоднородные по степени крепости. Песчаники кослоистые в нижней части и горизонтально-слоистые в верхней, отмечаются тонкие прослой бурых глин и незрелых палеопочв |
| | | Zh-4 | А9 (обнажение 1029) [Golubev et al., 2012] | Проба представляет собой заполнитель серых гравелитов: серые мелко- и среднезернистые массивные песчаники. Гравий в опробованном слое сложен субизометричными, часто уплощенными, угловатыми обломками мергелей |
| | 56.179339° 42.641035° | Zh-123 | 6 (обнажение 1151) [Golubev et al., 2012] | Серые мелкозернистые массивные полимиктовые песчаники с редкими включениями мелкого гравия серого мергеля |
| | 56.179759° 42.636625° | Zh-11 | 27 (обнажение 1023) [Golubev et al., 2012] | Серо-желтые среднезернистые слабосцементированные олигомиктовые песчаники с прослоями пятнистых глин. Нижняя граница слоя резкая, эрозивная |
| Асташиха | 56.920614° 45.335863° | А12D А-10 А-4 | | Рыжевато-коричневые средне- и мелкозернистые полимиктовые песчаники |
| Недуброво | 60.04521° 45.74047° | Н-1 | 11 [Arefiev et al., 2015] | Линзы серых алевроитов в верхней части слоя |
| | | Н-3 | 4 [Arefiev et al., 2015] | Серо-коричневые тонкоплитчатые алевропесчаники |
| Клыково | 60.573175° 46.414272° | К-4 | 6 (линза Клыково-III) [Arefiev et al., 2016a] | Серовато-коричневые мелко- и среднезернистые полимиктовые песчаники с примесью гравия |
| | | К-5 | 1 (линза Клыково-I) [Arefiev et al., 2016a] | Зеленовато-серые мелко- и среднезернистые слабосцементированные полимиктовые песчаники |
| Балебиха | 60.726090° 46.388317° | Б-3 | 9 [Arefiev et al., 2016b] | Зеленовато-рыжие среднезернистые полимиктовые пески с линзами голубовато-серых гравелитов нижней части слоя |

отобраны из нижней (проба Н-3) и верхней (проба Н-1) части разреза.

Разрезы Клыково и Балебиха обычно рассматриваются в качестве составляющих сводных разрезов пограничных толщ перми и триаса нижнего течения р. Юг и бассейна р. Малая Северная Двина соответственно [Arefiev et al., 2016a, 2016b]. Однако вохминский горизонт нижнего триаса, сложенный грубыми русловыми аллювиальными отложениями, присутствует только вблизи деревень Клыково и Балебиха. Примечательно, что для этих двух хорошо сопоставимых друг с другом составных разрезов ранее был детально проанализирован состав минералов тяжелой фракции [Arefiev et al., 2016b]. Пробы для датирования зерен обломочного циркона были отобраны в разрезе Балебиха из вохминского горизонта (Б-3), а в разрезе Клыково – из вохминского горизонта (проба К-4) и нижней части нефедовского горизонта (проба К-5) (табл. 1).

Координаты точек отбора проб и краткая литологическая характеристика соответствующих пород приведены в табл. 1.

3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1. U-Pb LA-ICP-MS датирование циркона

Представительное (70–150 шт.) количество зерен циркона было получено для каждой из 12 проб песчаников и алевропесчаников, характеризующих различные стратиграфические уровни пяти представительных пермско-триасовых разрезов Русской плиты (рис. 1; табл. 1). Зерна относятся к размерной фракции 50–200 мкм. Выделение циркона проводилось по стандартным методикам с применением тяжелых жидкостей и электросепарации в минералогических лабораториях ИГГД и ИГЕМ РАН. Для каждой пробы были получены катодолюминесцентные (CL) изображения (Прил. 1 на странице статьи онлайн). Для двух проб (Zh-123, A12D) съемка проводилась в режиме цветной катодолюминесценции с помощью электронно-зондового микроанализатора Cameca MS-46 (ИГЕМ РАН). Для остальных проб CL-изображения были получены с использовани-

ем панхроматических детекторов сканирующих электронных микроскопов TESCAN VEGA 3 (ИГГД РАН) и TESCAN MIRA IV (ИФЗ РАН).

Непосредственно U-Pb LA-ICP-MS датирование было реализовано в различных лабораториях. В ИГГД РАН и ГИН СО РАН измерения осуществлялись на масс-спектрометрах Element XR с установками для лазерной абляции NWR-213; диаметр пучка лазера составлял 25–30 мкм. Расчет изотопного U-Pb возраста в ИГГД РАН производился относительно внешнего стандарта GJ-1, а в ГИН СО РАН – Harvard 91500 [Horstwood et al., 2016]. В ИЗК СО РАН U-Pb LA-ICP-MS датирование детритового циркона было реализовано с использованием квадрупольного масс-спектрометра Agilent 7900 и системы лазерной абляции Analyte Excite, диаметр кратеров абляции – 35 мкм, внешний стандарт – циркон Plešovice [Sláma et al., 2008]. Оценки изотопного возраста для внутренних стандартов циркона, полученные в соответствующих лабораториях, приведены в табл. 2 и согласуются с оценками, полученными методом ID-TIMS. Изотопные отношения по данным ИГГД РАН и ГИН СО РАН рассчитывались в программе Glitter [Griffin et al., 2008], по данным ИЗК СО РАН – в Iolite 4.0 [Paton et al., 2011]. Все погрешности определения возраста приведены на уровне $\pm 2\sigma$.

Для дальнейшего анализа и графических построений использованы оценки изотопного возраста, полученные по отношению $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ в случае зерен моложе 1 млрд лет и по отношению $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ – для более древних. Коэффициент дискордантности также учитывался в зависимости от возраста циркона: если возраст не превышал 1 млрд лет, принималось значение D_1 , рассчитанное для оценок изотопного возраста, полученных по отношениям $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ и $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$, в противном случае – D_2 , рассчитанное на основе возрастов $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ и $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$. Отбраковывались оценки изотопного возраста с дискордантностью $|D| > 10\%$. «Мягкий» фильтр был выбран в связи с высокой чувствительностью статистических тестов к относительному объему выборок. В сравнении с возрастными спектрами,

Таблица 2. Данные измерения внутренних стандартов циркона
Table 2. Data on measurements of the secondary zircon standards

| Лаборатория | Стандарт | Изотопное отношение | Возраст, аттестованный методом ID-TIMS (млн лет) | Источник | Возраст, полученный в настоящем исследовании (млн лет) |
|-------------|---------------|---|--|--------------------------|--|
| ИГГД РАН | Harvard 91500 | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | 1066 \pm 0.6 1064 \pm 0.4 | [Horstwood et al., 2016] | 1066 \pm 5 1065 \pm 5 |
| | Plešovice | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | 337.1 \pm 0.4 | [Sláma et al., 2008] | 336 \pm 2 |
| ГИН СО РАН | GJ-1 | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | 601.9 \pm 0.4 607.7 \pm 0.7 | [Horstwood et al., 2016] | 599 \pm 3 586 \pm 28 |
| | Plešovice | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | 337.1 \pm 0.4 | [Sláma et al., 2008] | 338 \pm 2 |
| ИЗК СО РАН | GJ-1 | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | 601.9 \pm 0.4 607.7 \pm 0.7 | [Horstwood et al., 2016] | 597 \pm 3 619 \pm 17 |
| | R33 | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | 419.3 \pm 0.4 | [Black et al., 2004] | 422 \pm 3 |

полученными при более строгой фильтрации данных, качественно значимых различий обнаружено не было. Таблицы, содержащие все исходные данные LA-ICP-MS датирования обломочного циркона, приведены в Прил. 2 на странице статьи онлайн, а графики зависимости Th/U отношений от возраста зерен обломочного циркона для изученных проб – в Прил. 3 на странице статьи онлайн.

Графические построения и статистическая обработка данных проведены с использованием программы IsoplotR [Vermeesch, 2018], а также Dezirteer [Powerman et al., 2021] – с ее помощью рассчитаны значения пиков для кривых распределения возрастов. Для каждой пробы были построены гистограммы и графики оценки плотности ядра (KDE, Kernel Density Estimation) с фиксированной полосой пропускания «20». Для каждого разреза графики были нормализованы так, чтобы площадь под ними была одинаковой. Количественное сопоставление данных проведено на основе статистического теста Колмогорова – Смирнова (K-S тест). Критерий Колмогорова – Смирнова позволяет выявить наличие статистически значимого различия для пары возрастных распределений: если сгенерированная вероятность меньше порогового значения $p < 0.05$, то источники сноса для сравниваемых пород различны (на уровне доверия $\alpha 95$). При этом вероятность идентичности источников сноса K-S тест может оценить только косвенно [Guynn, Gehrels, 2010]. Это ограничение связано с тем, что анализируются только возрасты зерен циркона, которые сами по себе могут характеризовать разновозрастные, но разные по происхождению и географическому положению источники. Осторожность в интерпретации также следует соблюдать в связи чувствительностью метода к объемам анализируемых выборок, неоднородности и дискретности исходных данных. Результаты теста Колмогорова – Смирнова были визуализированы при помощи многомерного шкалирования (Multi-Dimensional Scaling, MDS), предложенного в качестве эффективного метода анализа большого количества наборов изотопных возрастов зерен обломочного циркона в [Vermeesch, 2013]. Соответствующая диаграмма, отображающая меру сходства изученных проб между собой, была построена в программе IsoplotR [Vermeesch, 2018].

3.2. Рамановская спектроскопия циркона

Съемка рамановских спектров зерен циркона выполнена в ЦКП ИФЗ РАН [Veselovskiy et al., 2022] с использованием рамановской приставки EnSpectr R532 к прямому оптическому микроскопу Olympus BX53M: длина волны лазера составляла 532 нм, мощность 30 мВт, использовался 50-кратный объектив; для каждого зерна усреднялись значения, полученные в ходе пяти циклов измерений с экспозицией 5 с. Погрешность определения положения пика $\nu_3(\text{SiO}_4)$ составляет $\pm 1 \text{ см}^{-1}$. Приблизительный возраст наложенных термальных событий оценивался нами по методике, детально описанной в работе [Resentini et al., 2020]: пересчетом дозы

излучения таким образом, чтобы при аппроксимации по методу наименьших квадратов облака точек, попадающих в область значений, ожидаемых для неотожженных зерен, и облака точек, отклоняющихся от этого тренда в правую часть графика, значение величины достоверности аппроксимации R^2 было максимальным.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

4.1. U-Pb LA-ICP-MS датирование зерен обломочного циркона

В опорном разрезе Жуков овраг было опробовано четыре стратиграфических уровня. Проба Zh-56, характеризующая вохминский интервал разреза, содержит зерна циркона с широким диапазоном возрастов (рис. 2, а) – от 336 до 3219 млн лет. Выявлено доминантный пик на кривой KDE с максимумом 357 млн лет формирует палеозойская группа (57 %). Оценки изотопного возраста остальных зерен относительно равномерно распределены в интервале 920–2020 млн лет, зерна архейского возраста единичны. Следует отметить, что данная проба наименее представительна и содержит всего 61 зерно циркона с кондиционными оценками возраста. График распределения оценок изотопного возраста циркона из пробы Zh-4, отобранной из верхней части жуковского горизонта, выражен полимодальный (рис. 2, б). Можно выделить три отчетливых моды – 363, 1043 и 1635 млн лет – и еще три максимума подчиненного значения – 525, 1867 и 2715 млн лет. Основной объем выборки (85 %) попадает в протерозойский интервал возрастов (938–1988 млн лет). Проба Zh-123, также характеризующая жуковский интервал разреза, напоминает распределение для вохминской части разреза (рис. 2, в). Несмотря на то, что U-Pb возрасты распределены в широком диапазоне – от 319 до 2695 млн лет, около половины всей выборки группируется в узком интервале с максимумом 373 млн лет. Возраст обломочного циркона, характеризующего самый нижний из опробованных стратиграфических интервалов разреза Жуков овраг – верхнюю часть нефедовского горизонта (проба Zh-11), варьируется в пределах от 338 до 2747 млн лет (рис. 2, г). Около 70 % всего объема выборки составляют зерна с возрастом в диапазоне 940–2080 млн лет, на кривой KDE они образуют два отчетливых пика – 1021 и 1781 млн лет. Палеозойская генерация циркона формирует выраженный максимум 361 млн лет. Малопредставительная популяция зерен позднеархейского возраста сгруппирована на участке с максимумом 2675 млн лет, а благодаря трем зернам вендского возраста наблюдается небольшой пик 617 млн лет, сопоставимый с аналогичными в верхнепермских пробах Zh-123 и Zh-4. Распределение, в целом, воспроизводит возрастную спектр Zh-4.

Возрастные распределения для всех трех проб из разреза Асташиха (А-4, А-10 и А12D) фактически идентичны (рис. 3). В каждой присутствует представительная девонско-каменноугольная популяция с максимумом

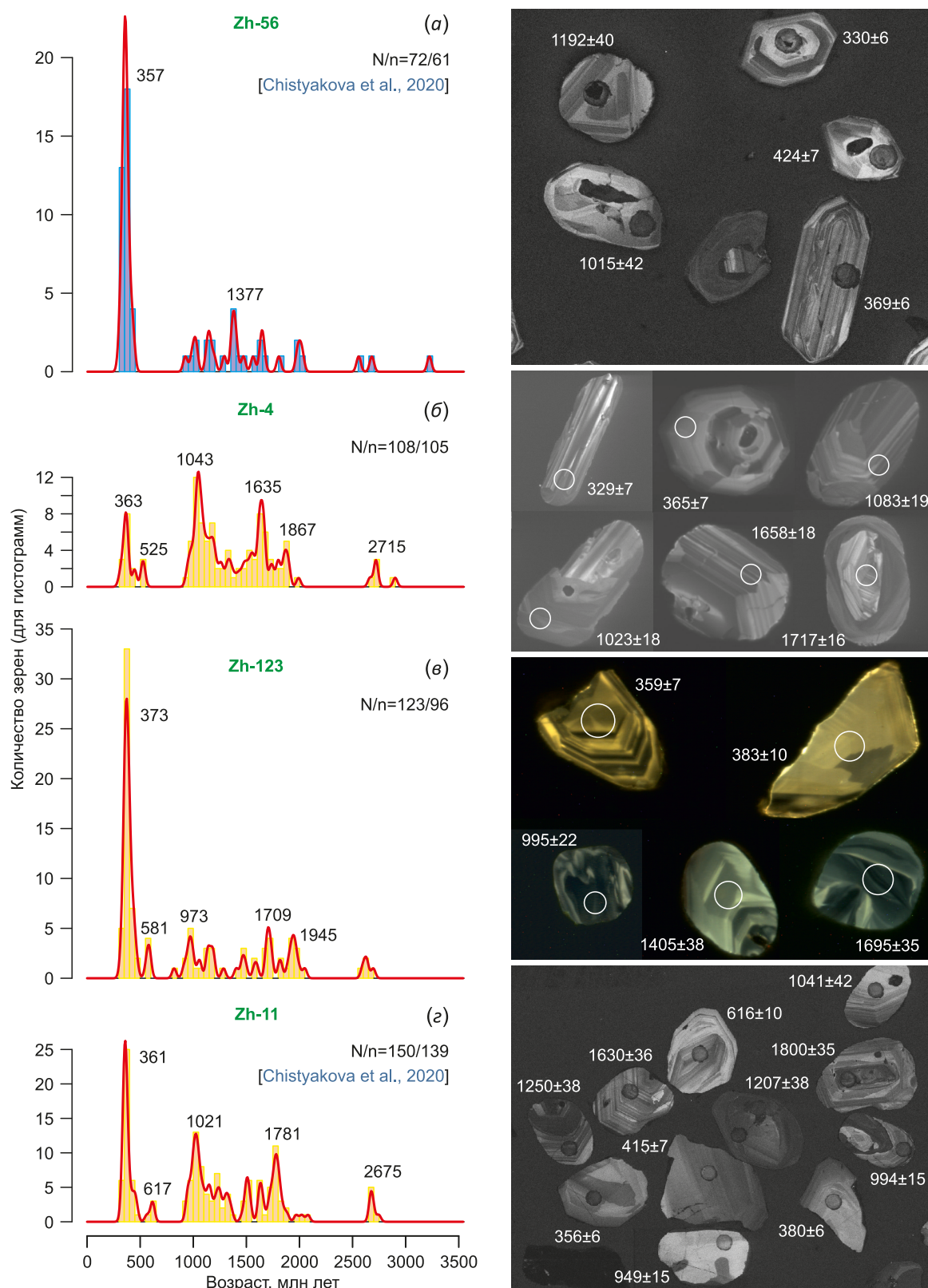


Рис. 2. Нормализованные распределения возрастов зерен обломочного циркона (гистограммы и кривые KDE) для опорного разреза Жуков овраг.

Справа от графиков приведены CL-изображения с характерным внутренним строением зерен разных возрастных популяций. N – общее количество датированных зерен, n – количество оценок изотопного возраста с $|D| < 10\%$. Модальные значения представленных пиков обозначены в миллионах лет.

Fig. 2. Normalized detrital zircon U-Pb age distributions (histograms and KDEs) from the Zhukov ravine reference section.

On the right are typical CL images of grains from different age populations. N is a total number of grains analyzed; n is a number of grains having discordance $< 10\%$. The numbers mark representative age peaks (Ma).

на кривой KDE около 360 млн лет. Однако основная часть оценок изотопного возраста (75–80 %) распределена в интервале 900–2000 млн лет, где график в целом имеет бимодальный характер с главным минимумом на уровне около 1300 млн лет. Небольшая популяция вендско-раннекембрийских возрастов на кривой KDE уверенно выделяется только в пробе A12D (рис. 3, а).

В обеих пробах из разреза Недуброво однозначно доминирует палеозойская группа зерен, оценки изотопного возраста которой концентрируются в сравнительно узком интервале – 290–440 млн лет и формируют пик на кривой KDE с модой около 350 млн лет (рис. 4). На фоне этого яркого максимума остальные оценки изотопного возраста, относительно равномерно

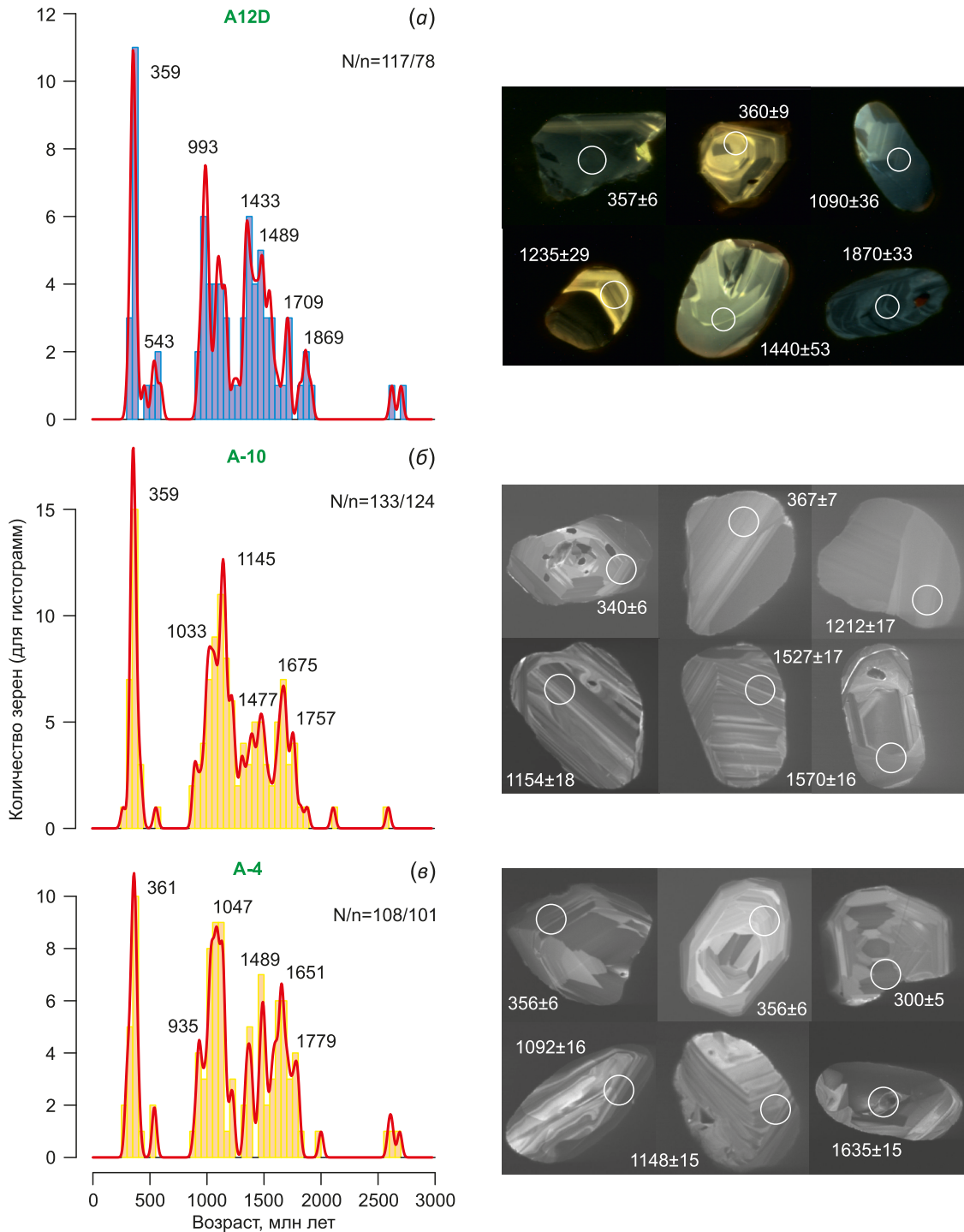


Рис. 3. Нормализованные распределения возрастов зерен обломочного циркона (гистограммы и кривые KDE) для разреза Асташиха. Остальные обозначения см. на рис. 2.

Fig. 3. Normalized detrital zircon U-Pb age distributions (histograms and KDEs) from the Astashikha section. Other designations are the same as in Fig. 2.

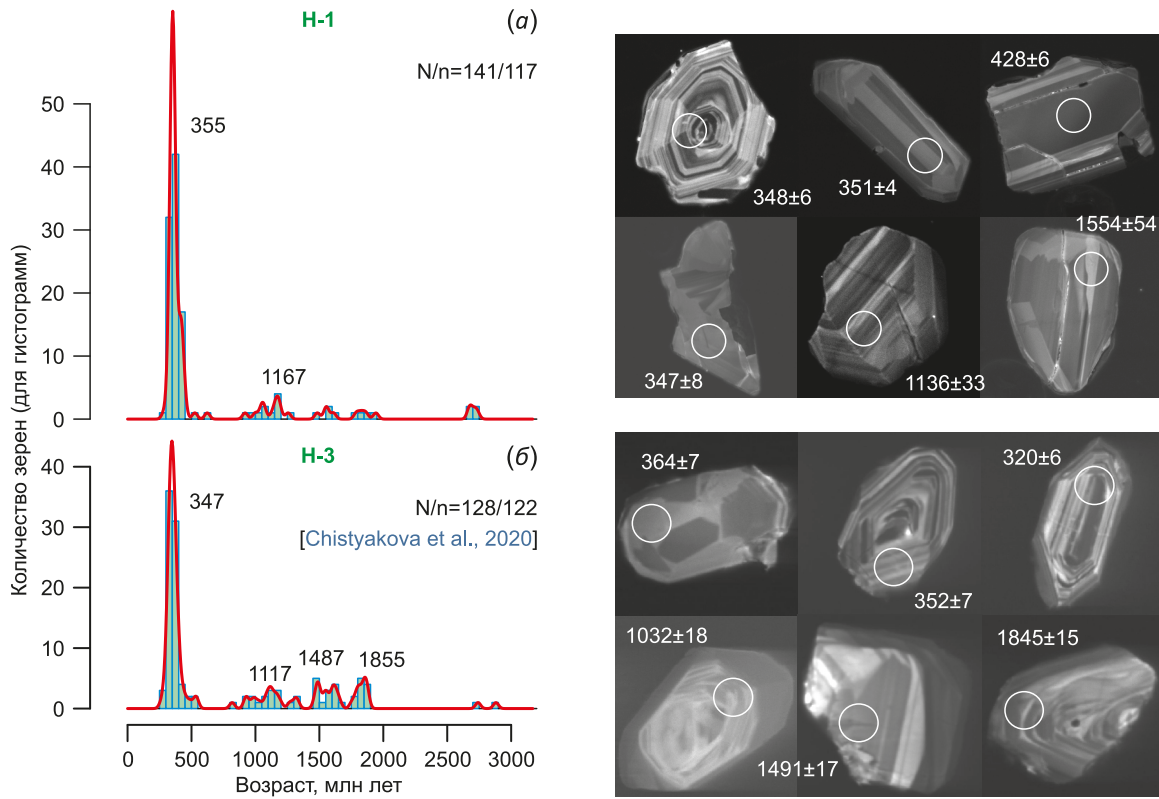


Рис. 4. Нормализованные распределения возрастов зерен обломочного циркона (гистограммы и кривые KDE) для разреза Недуброво. Остальные обозначения см. на рис. 2.

Fig. 4. Normalized detrital zircon U-Pb age distributions (histograms and KDEs) from the Nedubrovo section. Other designations are the same as in Fig. 2.

распределенные в рамках протерозойского интервала, выражены слабо. Таким образом, существенных различий в полученных возрастных спектрах для двух изученных проб не наблюдается, за исключением того, что в верхней части разреза приблизительно вдвое сокращается доля зерен с докембрийским возрастом: в пробе H-3 циркон с протерозойскими оценками изотопного возраста составляет 34 %, а для H-1 – 16 % всей выборки.

В пробе K-4 (рис. 5, а) из вохминского интервала разреза Клыкво наиболее интенсивный пик на кривой KDE, с главным максимумом 349 млн лет и локальным – 425 млн лет, формирует палеозойская группа зерен, представляющая 44 % всей выборки. Остальной объем выборки составляют зерна с архей-протерозойским возрастом: в интервале 900–2000 млн лет наблюдаются несколько относительных максимумов, а архейские зерна сгруппированы обособленно вблизи отметки 2.7 млрд лет. Также следует отметить факт обнаружения в данной пробе двух зерен циркона, возраст которых оценивается как непосредственно близкий ко времени формирования исследуемых пород – 250±3 и 251±3 млн лет. Проба K-5 из нефедовского горизонта разреза отличается почти абсолютным доминированием (87 %) палеозойской группы зерен циркона с модальным значением на кривой распределения возрастов 349 млн лет (рис. 5, б).

Проба Б-3 характеризует вохминский интервал разреза Балебиха, представляющий собой крупный аллювиальный врез, который аналогичен интервалу отбора пробы K-4 разреза Клыкво. Однако распределения возрастов обломочного циркона для этих двух проб совпадают между собой не в полной мере (рис. 5, а; рис. 6). Так, в возрастном спектре пробы Б-3 выделяется интенсивный пик для палеозойской популяции с модальным значением 351 млн лет, а характер распределения возрастов в протерозойском интервале близок к бимодальному – два наиболее выраженных максимума на кривой KDE 997 и 1487 млн лет. Также, в отличие от возрастного спектра для пробы K-4, в пробе Б-3 отсутствует локальный максимум вблизи 400 млн лет.

Поиск непосредственных источников циркона для сложно построенных континентальных толщ центральных областей крупной платформы с мощным чехлом – весьма специфичная задача [Andersen et al., 2016]. Мы приведем несколько вариантов интерпретации, которые могут взаимодополнять друг друга. Судя по полученным оценкам изотопного возраста, первичными источниками циркона в изученных разрезах Русского бассейна могли служить следующие кристаллические комплексы.

1. Магматические породы девонского и каменноугольного возраста, широко развитые в пределах Уральского орогена [Puchkov, 2010; Fershtater, 2013].

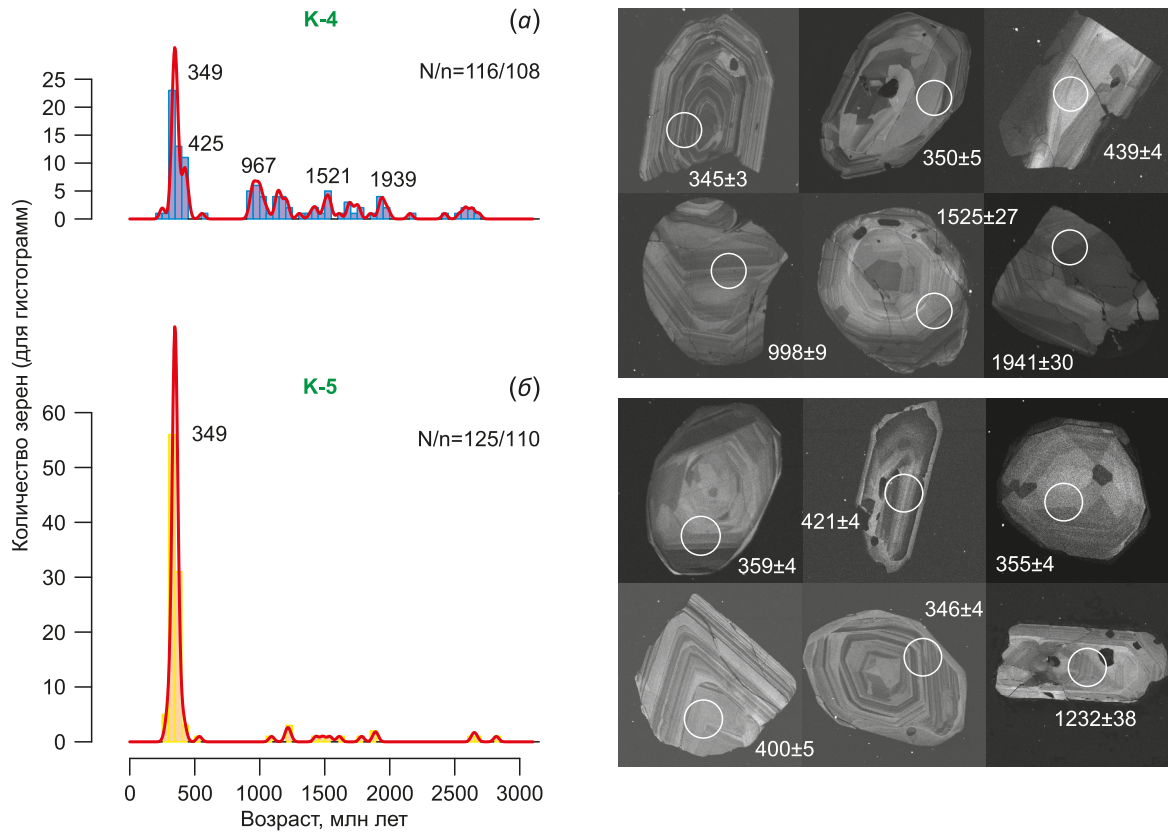


Рис. 5. Нормализованные распределения возрастов зерен обломочного циркона (гистограммы и кривые KDE) для разреза Клыкovo. Остальные обозначения см. на рис. 2.

Fig. 5. Normalized detrital zircon U-Pb age distributions (histograms and KDEs) from the Klykovo section. Other designations are the same as in Fig. 2.

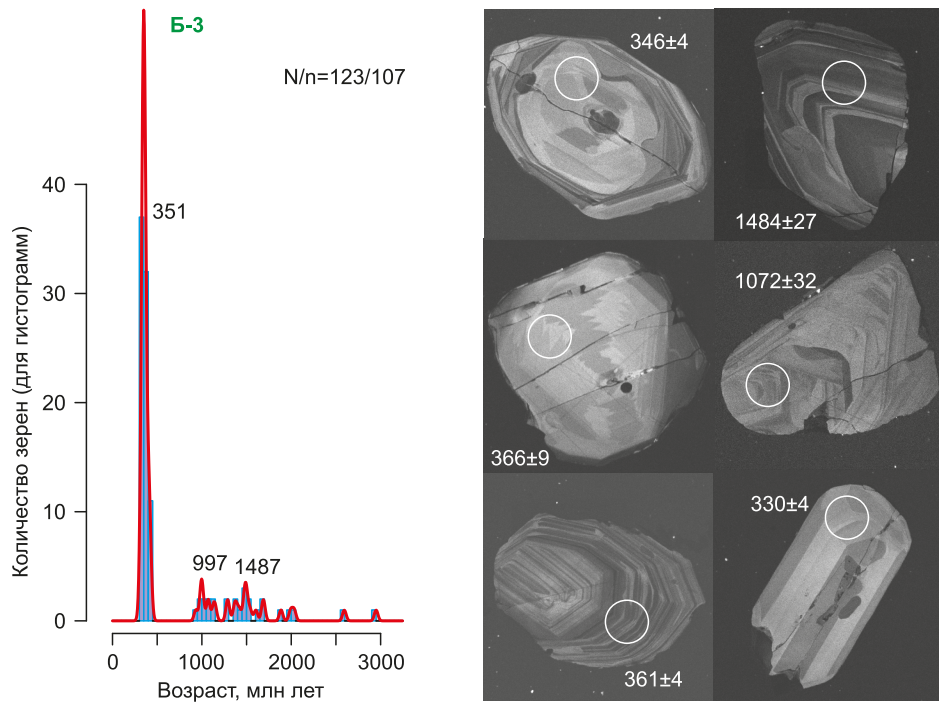


Рис. 6. Распределение возрастов зерен обломочного циркона (гистограмма и кривая KDE) для разреза Балебиха. Остальные обозначения см. на рис. 2.

Fig. 6. Detrital zircon U-Pb age distribution (histogram and KDE) from the Balebikha section. Other designations are the same as in Fig. 2.

2. Комплексы, связанные с процессами становления Тиманского (Протоуральского) складчатого пояса в интервале 530–750 млн лет [Puchkov, 2010; Soboleva et al., 2012; Kuznetsov et al., 2014a].

3. Свеконорвежский [Bingen et al., 2021; Mints, 2017] и Свеконорвежский [Daly et al., 2006] выступы кристаллических пород, для которых характерен циркон с возрастом около 1.0 и 1.6–1.8 млрд лет соответственно. Вместе с тем породы, содержащие циркон протерозойского возраста, также известны для комплексов, в настоящее время слагающих фундамент Тимано-Печорского региона и локально обнажающихся в районе Тиманского кряжа [Pystin et al., 2020, и ссылки в данной работе]. Однако возможен и третий вариант поступления циркона протерозойского возраста в центральные районы Восточно-Европейской платформы: исследования венд-палеозойских терригенных комплексов Южного Урала [Kuznetsov et al., 2014b] показали присутствие в них зерен обломочного циркона, распределение возрастов которых аналогично известным для Фенноскандии. Значительная (свыше 2000 км) удаленность Свеконорвежского и Свеконорвежского доменов позволила авторам предположить наличие внебалтийских источников со схожими возрастными характеристиками. Таким образом, сохраняется неоднозначность идентификации питающей провинции с «фенноскандинавским» сигналом, отмеченная в результате анализа минералов тяжелой фракции [Lozovsky, Esaulova, 1998].

4. Позднеархейские комплексы Карельско-Кольского и/или Волго-Уральского региона [Daly et al., 2006].

5. Иные локальные выступы архей-протерозойского фундамента Восточно-Европейской платформы.

Непосредственными источниками сноса при формировании пограничных пермско-триасовых пород Русской плиты, очевидно, могли являться относительно более древние осадочные породы, образовавшиеся ранее за счет эрозии описанных кристаллических комплексов. Также нельзя исключить достаточно высокую степень рециклирования циркона непосредственно в масштабах исследуемых пермско-триасовых континентальных толщ.

Таким образом, в данной работе характеристика питающих провинций дается в терминах «провенанс-сигналов» – репрезентативных наборов значений возрастов циркона, связанных с наиболее типичными и широко распространенными магматическими, метаморфическими, а также терригенными комплексами определенных регионов и отвечающих разным этапам их развития. Однако с учетом сохраняющейся высокой вариативности в интерпретации источников докембрийских зерен циркона авторы статьи предлагают рассматривать выявленные провенанс-сигналы, в первую очередь, по степени контрастности их возрастных характеристик и выделять венд-палеозойский и палеомезопротерозойский сигналы. Следует отметить, что в связи с соответствием основных максимумов KDE известным глобальным эпизодам тектономагматической активизации [Pastor-Galán et al., 2019]

крайне широкая интерпретация возможных источников циркона на основании исключительно U-Pb возрастов совершенно естественна.

На рис. 7 приведен вариант стратиграфической корреляции пяти изученных пермско-триасовых разрезов, основанный на биостратиграфических, магнито-стратиграфических и изотопно-геохимических данных. Разрезы представлены красноцветными песчано-глинистыми породами нефедовского, жуковского и вохминского горизонтов. При этом достоверное определение положения границы перми и триаса (верхневятский подъярус и индский ярус соответственно) в рассматриваемых стратиграфических последовательностях Русской плиты на настоящий момент не представляется возможным. Тем не менее по изотопно-геохимическим данным пермско-триасовая граница располагается внутри нижневохминского подгоризонта.

Комплексный анализ U-Pb возрастов зерен обломочного циркона из разрезов центральных районов Восточно-Европейской платформы выявил следующие закономерности (рис. 8). Генерально выделяются два типа возрастных спектров:

(1) в выборке в относительно равной степени представлены архей-протерозойская и палеозойская (50–80 % всей выборки) популяции, но на кривой KDE ярко выраженный доминантный пик расположен в интервале 350–370 млн лет (например, проба Zh-56, см. рис. 2, а);

(2) основная часть выборки (70–85 %) представлена популяцией зерен архей-протерозойского возраста, которая, как правило, распадается на две субпопуляции, а палеозойская популяция зерен имеет подчиненное значение (например, проба Zh-4, см. рис. 2, б).

Распределение возрастов обломочного циркона, полученное для нижнефедовского стратиграфического уровня (проба K5) (рис. 8), относится к спектрам первого типа (вклад венд-палеозойского провенанс-сигнала не менее 50 %). Выше, в верхнефедовских слоях (проба Zh-11), фиксируется возрастная спектр второго типа – доминирует палеомезопротерозойский провенанс-сигнал (70–85 %). Всего в ~7 м вверх по разрезу, в нижнежуковском стратиграфическом интервале (уровень пробы Zh123), наблюдается реорганизация питающих провинций в пользу доминантного венд-палеозойского сигнала. Однако уже в пределах верхнежуковской части разрезов, в границах стратиграфического интервала, объединяющего пробы Zh-4 и A-4, вновь фиксируются надежно коррелирующие между собой спектры возрастов зерен обломочного циркона второго типа с выраженным главенствованием палеомезопротерозойского сигнала. Закономерное чередование двух типов распределений возрастов зерен обломочного циркона прослеживается и дальше. Для вохминских интервалов разрезов Жуков овраг, Клыково и Балебиха (пробы Zh56, K-4, B3) получены возрастные спектры первого типа. При этом вохминский уровень разреза Асташиха (пробы A-10 и A12D) характеризуется долей палеомезопротерозойского провенанс-сигнала

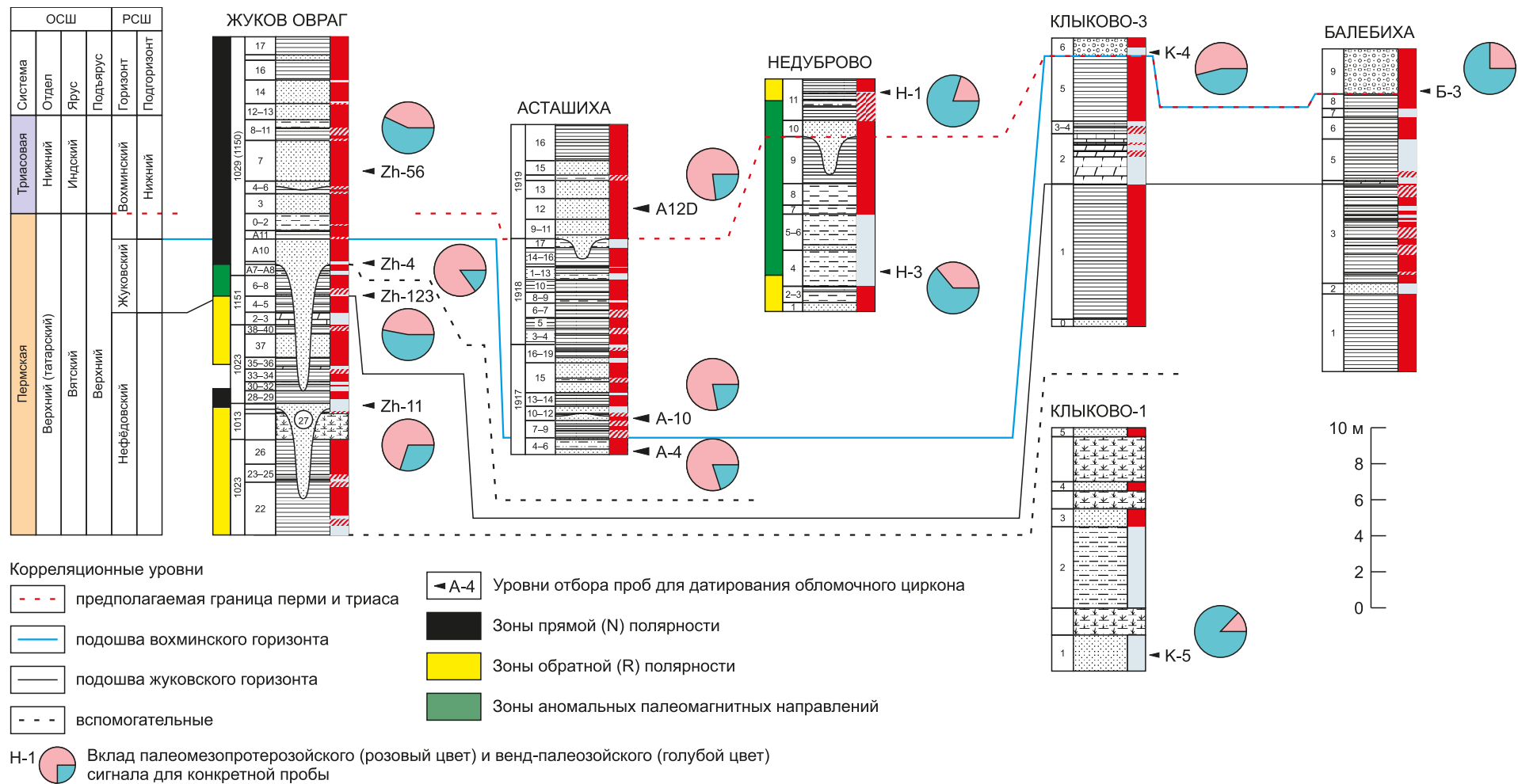


Рис. 7. Вариант схемы стратиграфической корреляции изученных разрезов пограничных отложений перми и триаса Русской плиты, составленный В.К. Голубевым на основе оригинальных материалов и с учетом данных, опубликованных в работах [Arefiev et al., 2016a, 2016b; Fetisova et al., 2018, 2022].

Fig. 7. The stratigraphic correlation of the studied Permian-Triassic boundary sections, compiled by V.K. Golubev using the original data and the data published in [Arefiev et al., 2016a, 2016b; Fetisova et al., 2018, 2022].

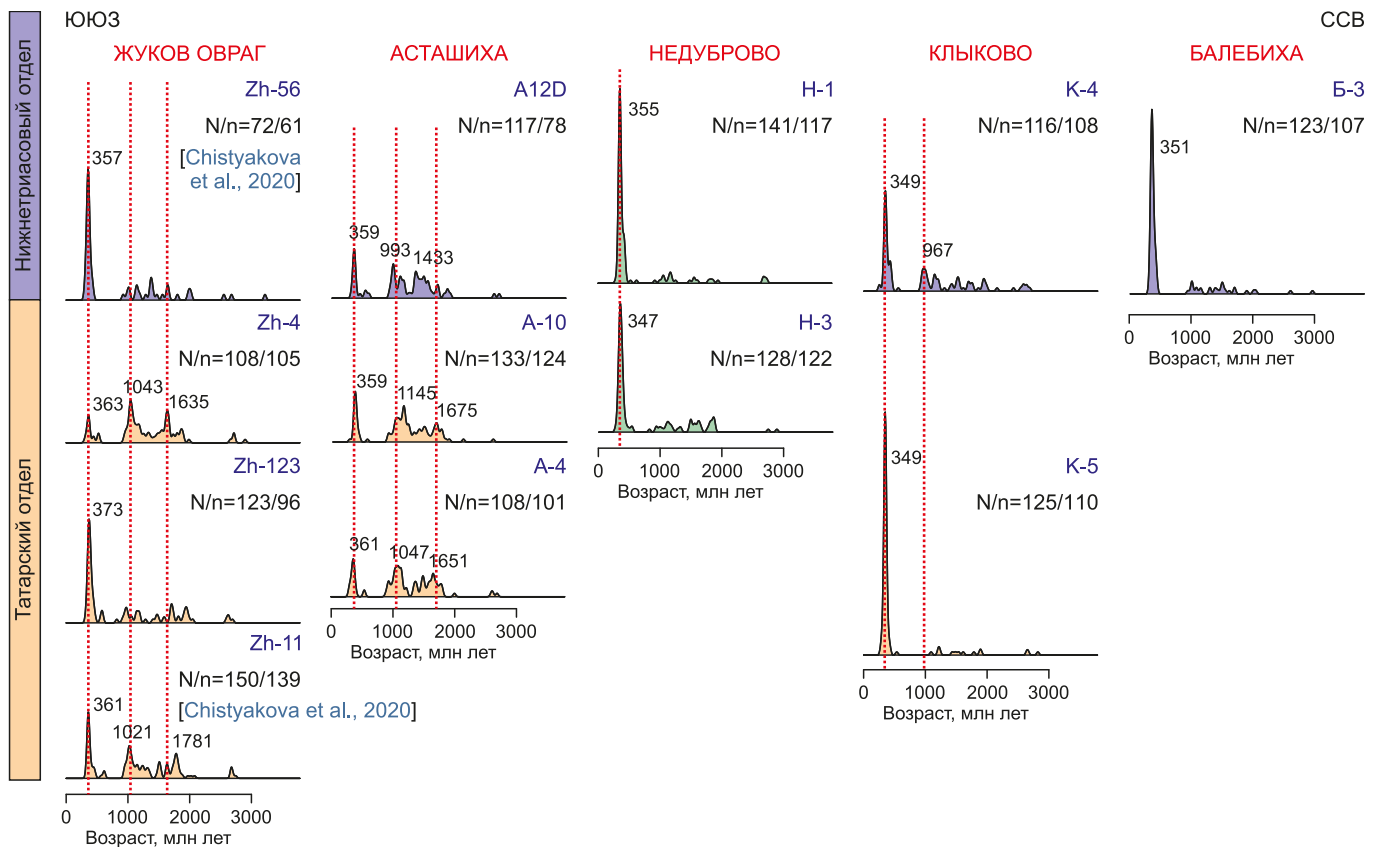


Рис. 8. Результаты U-Pb LA-ICP-MS датирования обломочного циркона из пограничных пермско-триасовых разрезов восточного борта Московской синеклизы (нормализованные графики KDE). N – общее количество датированных зерен, n – количество оценок изотопного возраста с $|D| < 10\%$. Модальные значения представительных пиков обозначены в миллионах лет. Пунктирные линии проведены через основные максимумы на кривых KDE.

Fig. 8. Results of U-Pb LA-ICP-MS dating of detrital zircon from the Permian-Triassic boundary sections of the eastern part of the Moscow basin (normalized KDEs). N – a total number of grains analyzed; n – a number of grains having discordance $< 10\%$. The numbers mark representative age peaks (Ma). The dotted lines are drawn across the main age peaks of KDE curves.

не менее 70–85 %. Следовательно, стратиграфические аналоги вохминских отложений асташихинского разреза в разрезе Жуков овраг (1) располагаются в нижней части вохминского горизонта ниже уровня пробы Zh-56 или (2) отсутствуют вовсе (стратиграфический перерыв).

Если рассматривать распределения возрастов зерен обломочного циркона разреза Жуков овраг в качестве эталонных для соответствующих стратиграфических уровней в пределах Московского бассейна, то можно также допустить следующие уточнения стратиграфической схемы (см. рис. 7). Принимая во внимание новые палеомагнитные [Fetisova et al., 2022] и геохронологические данные, можно отметить, что породы разреза Недуброво коррелируют с интервалом аномальной палеомагнитной записи в нижней части жуковского горизонта опорного разреза Жуков овраг, охарактеризованной пробой Zh-123 (см. рис. 7). При этом верхним ограничением сопоставляемого интервала является уровень отбора пробы Zh-4, которая фиксирует реорганизацию питающих провинций в пользу

доминантного палеомезопротерозойского провенанс-сигнала. Таким образом, авторы статьи склонны пересмотреть выводы работы [Chistyakova et al., 2020] и по совокупности имеющихся независимых данных оценить возраст всего разреза Недуброво как раннежуковский. Тем не менее значительная удаленность разреза Недуброво от опорного объекта Жуков овраг не позволяет применить новые изотопно-геохронологические данные для убедительного обоснования стратиграфического положения недубровских слоев. В связи с этим при создании схемы эволюции питающих провинций были рассмотрены модели на основе двух вариантов стратиграфического положения проб H-3 и H-1: вохминского и нижнежуковского.

Высокую контрастность распределений возрастов обломочного циркона из пермско-триасовых комплексов Московской синеклизы хорошо иллюстрирует график сравнения кумулятивных кривых (рис. 9, а), который лежит в основе статистического сравнения по критерию Колмогорова – Смирнова. Результаты теста Колмогорова – Смирнова (табл. 3) визуализированы

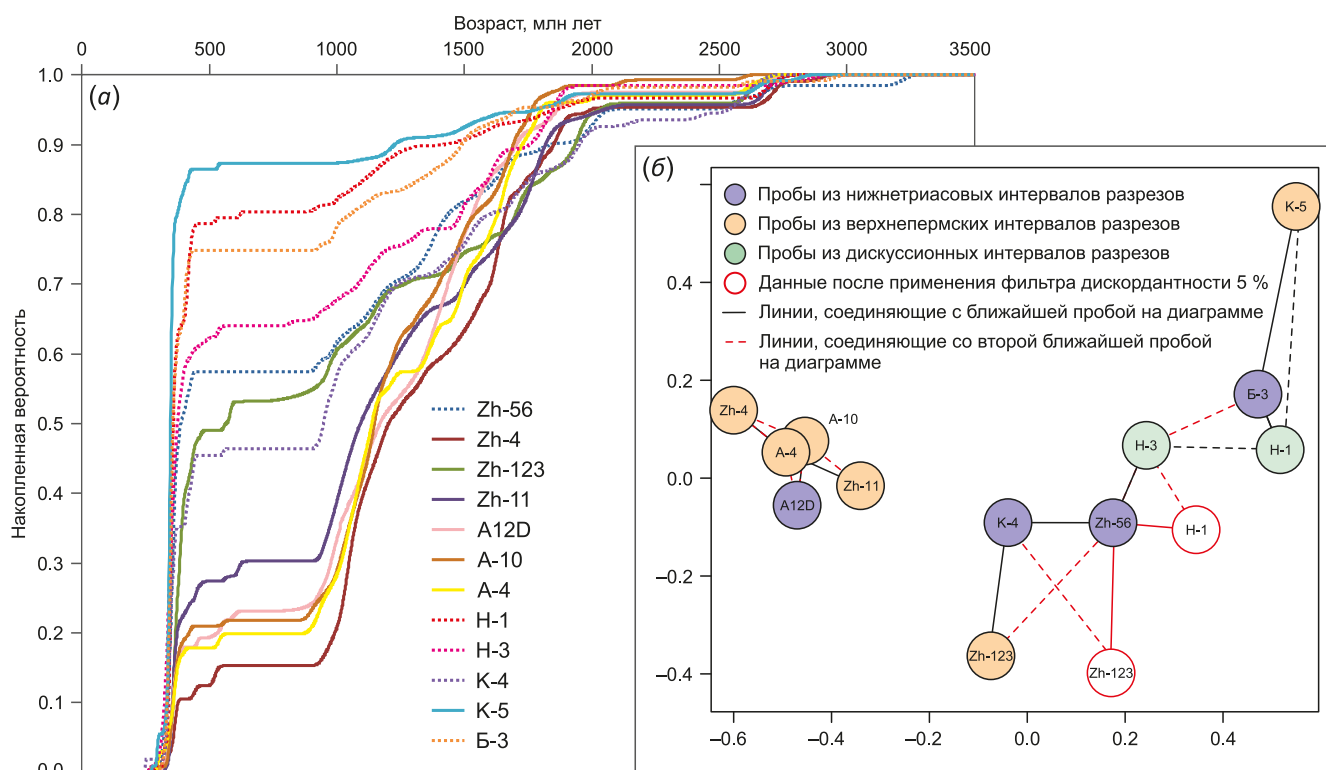


Рис. 9. Сравнение кумулятивных кривых для возрастных спектров циркона из изученных разрезов (а) и диаграмма, построенная методом многомерного шкалирования (MDS) и отражающая степень различия/сходства полученных распределений возрастов циркона (б).

Fig. 9. Compared cumulative curves for age spectra of zircon from the studied sections (a) and Kolmogorov – Smirnov-based Multi-dimensional scaling (MDS) plot reflecting the degree of difference/similarity between the obtained zircon age distributions (b).

Таблица 3. Результаты теста Колмогорова – Смирнова (расчеты величины *p* произведены с учетом погрешностей оценок изотопного возраста)

Table 3. Results of the Kolmogorov – Smirnov test (*p* values calculated taking into account errors in isotopic age determination)

| Разрез Интервал Проба | Жуков овраг | | | | Асташиха | | | Недуброво | | Клыково | | Балебиха |
|-----------------------------|-------------|-------|--------|-------|----------|-------|-------|-----------|-------|---------|-------|----------|
| | Zh-56 | Zh-4 | Zh-123 | Zh-11 | A12D | A-10 | A-4 | H-1 | H-3 | K-4 | K-5 | Б-3 |
| Zh-56 | | 0.000 | 0.065 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.029 | 0.677 | 0.254 | 0.000 | 0.134 |
| Zh-4 | | | 0.000 | 0.039 | 0.228 | 0.184 | 0.888 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Zh-123 | | | | 0.002 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.119 | 0.000 | 0.000 |
| Zh-11 | | | | | 0.591 | 0.331 | 0.480 | 0.000 | 0.000 | 0.021 | 0.000 | 0.000 |
| A12D | | | | | | 0.884 | 0.903 | 0.000 | 0.000 | 0.003 | 0.000 | 0.000 |
| A-10 | | | | | | | 0.852 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| A-4 | | | | | | | | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| H-1 | | | | | | | | | 0.048 | 0.000 | 0.002 | 0.988 |
| H-3 | | | | | | | | | | 0.007 | 0.000 | 0.176 |
| K-4 | | | | | | | | | | | 0.000 | 0.000 |
| K-5 | | | | | | | | | | | | 0.009 |
| Б-3 | | | | | | | | | | | | |

Условные обозначения:

| | |
|--|---------------------------------|
| | нижнетриасовый интервал разреза |
| | верхнепермский интервал разреза |
| | дискуссионный интервал |

0.065 0.029 параметр *p*; если *p* < 0.050, то пробы характеризуют различные источники сноса (на уровне доверия α95)

на диаграмме (рис. 9, б), построенной с помощью метода многомерного шкалирования (MDS): степень близости проб на этой диаграмме отражает степень их сходства по критерию Колмогорова–Смирнова. В ходе работы были сопоставлены результаты, полученные при фильтрах дискордантности 10 % (этот фильтр применялся для всех графических построений и при расчете значений в табл. 3) и 5 %: если положение на графике MDS для одной и той же пробы существенно различалось, то сохранялись оба варианта.

Пробы на диаграмме MDS образуют два кластера, что свидетельствует о принципиальном различии источников поступления обломочного материала для пород из этих двух групп. Следует отметить, что пробы Zh-4, A-4, A-10, A12D и Zh-11 образуют более ком-

пактный кластер, т.е. имеют большую общность источников сноса.

4.2. Рамановская спектроскопия

Исследования методом рамановской спектроскопии были проведены для одиннадцати проб, характеризующих бассейн Московской синеклизы (Прил. 4 на странице статьи онлайн). На всех графиках зависимости положения пика $\nu_3(\text{SiO}_4)$ от рассчитанной дозы альфа-излучения (рис. 10; Прил. 4) фиксируются кластеры точек, существенно отклоняющиеся от эмпирически полученного тренда для циркона, не подвергавшегося термическому отжигу [Nasdala et al., 2001]. При этом точки могут быть смещены как вправо от этого тренда, так и влево. В первом случае (красные точки

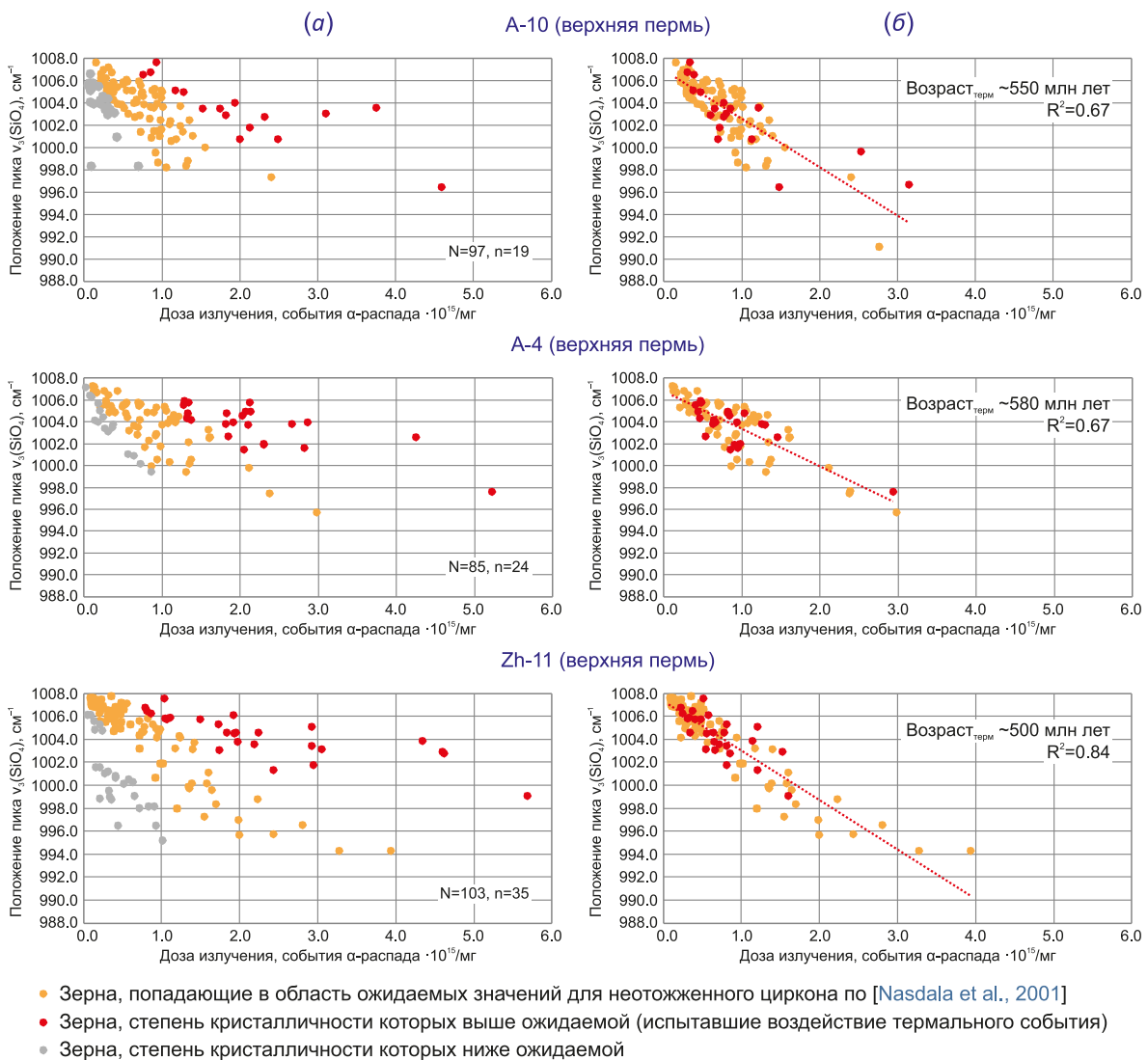


Рис. 10. Зависимость положения рамановского пика $\nu_3(\text{SiO}_4)$ от накопленной дозы альфа-излучения. (а) – изначально полученная, (б) – полученная после процедуры итеративной оценки возраста наложенного термального события. R^2 – величина достоверности линейной аппроксимации. Возраст_{терм} – возраст предполагаемого термального события. N – общее количество проанализированных зерен, n – количество зерен с признаками термального отжига.

Fig. 10. Relationship between $\nu_3(\text{SiO}_4)$ Raman peak position and accumulated alpha-radiation dose. (а) – obtained initially, (б) – obtained after iterative estimation of the thermal event age. R^2 – linear approximation confidence value. Возраст_{терм} – the proposed age of the thermal event. N – a total number of grains analyzed, n – a number of annealed grains.

на рис. 10, а) смещение объясняется частичным восстановлением кристаллической структуры циркона вследствие термального воздействия. Наблюдаемое занижение степени кристалличности (величина рамановского сдвига пика $\nu_3(\text{SiO}_4)$ существенно меньше ожидаемой для соответствующей величины альфа-дозы – серые точки на рис. 10, а), вероятно, отражает высокую степень гидротермальной переработки пород [Kaulina et al., 2017]. При дальнейших вычислениях анализы с заниженными оценками степени кристалличности во внимание не принимались.

Статистически значимое (20–30 %) количество зерен, подвергавшихся термическому отжигу, зафиксировано в трех пробах из верхнепермского интервала: Zh-11 (разрез Жуков овраг), А-10 и А-4 (разрез Асташиха). Для них была произведена оценка возраста термальных событий (рис. 10, б). Для пробы Zh-11 возраст

предполагаемого термального события составил около 500 млн лет, для проб А-10 и А-4 – около 550 и 580 млн лет соответственно. Учитывая высокую погрешность метода, можно рассматривать полученные оценки в рамках проявления единого термального события венд-кембрийского возраста.

Комплексный анализ результатов рамановской спектроскопии и U-Pb LA-ICP-MS датирования обломочного циркона (рис. 11) показал, что температурному воздействию подвергались зерна с оценками изотопного возраста в широком интервале – 900–3200 млн лет. При этом в относительно равной степени присутствует циркон из всех групп, формирующих значимые пики на графике распределения возрастов в обозначенном диапазоне. Широкий диапазон возрастов термически отоженных зерен, вероятно, свидетельствует о том, что термальное событие проявилось в некотором

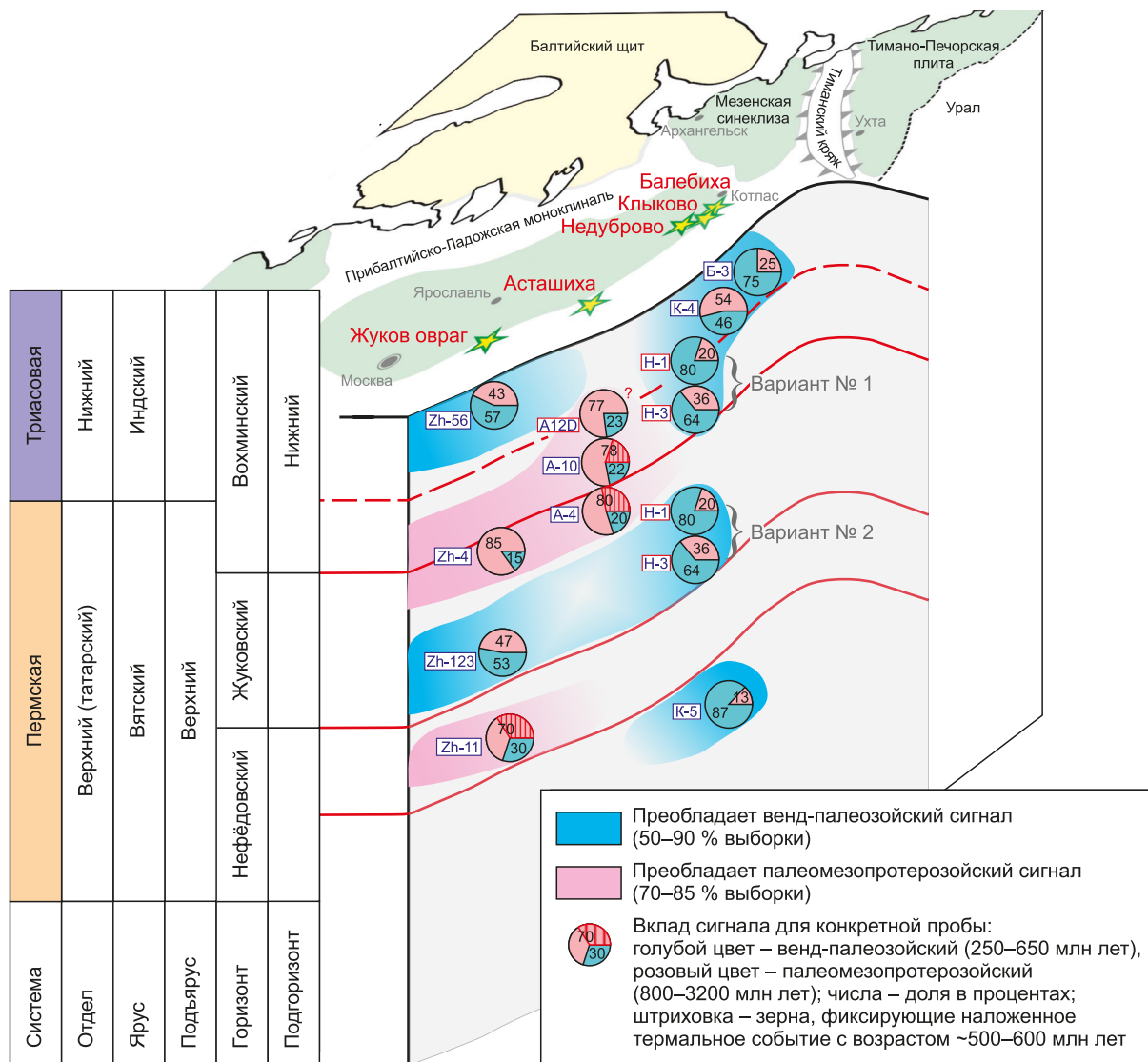


Рис. 11. Схема эволюции источников сноса обломочного материала на рубеже перми и триаса для восточного борта Московской синеклизы. На схеме отражены два варианта стратиграфического положения разреза Недуброво.

Fig. 11. Evolution of provenance of the Permian-Triassic detritus from the eastern part of the Moscow basin. The scheme represents two versions of stratigraphic position of the Nedubrovo section.

промежуточном осадочном бассейне. Венд-кембрийский возраст предполагаемого термального события позволяет соотнести его с тектономагматическими процессами, связанными с тиманским (протоуральским) складчатым сооружением, реликты которого обнаруживаются в пределах современного Уральского орогена [Puchkov, 2010]. Таким образом, описанный промежуточный бассейн должен был находиться вблизи восточной или северо-восточной (в современных координатах) окраины Восточно-Европейской платформы.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проанализировано более 1400 зерен обломочного циркона, выделенного из 12 проб, отобранных из пяти разрезов пограничных пермско-триасовых толщ восточного борта Московской синеклизы. Впервые для пермско-триасового терригенного комплекса Русской плиты получены представительные изотопно-геохронологические данные, которые использованы для реконструкции источников сноса Московского бассейна на рубеже палеозоя и мезозоя. Показано, что в ряде случаев результаты датирования зерен обломочного циркона могут служить источником независимых данных для уточнения схем внутрибассейновой корреляции и стратиграфического расчленения рассматриваемых толщ.

Главные выводы данной работы заключаются в следующем:

1. Результаты U-Pb LA-ICP-MS датирования обломочного циркона подтверждают высказанное ранее на основании анализа минералов тяжелой фракции [Arefiev et al., 2016b; Strok, Trofimova, 1976] представление о том, что пограничные осадочные комплексы перми и триаса центральных районов Восточно-Европейской платформы формировались в условиях конкуренции двух основных питающих провинций.

2. Эти конкурирующие питающие провинции характеризуются двумя контрастными провенанс-сигналами – венд-палеозойским и палеомезопротерозойским.

3. В поздневендское время реорганизация питающих провинций Московского бассейна происходила минимум дважды (рис. 11). Наблюдается чередование режима доминирования источников сноса дискуссионной геологической позиции, обладающих палеомезопротерозойскими возрастными характеристиками (75–80 % выборки), и режима усиления сноса обломочного материала с венд-палеозойским провенанс-сигналом в Московский бассейн за счет размыва комплексов уральид (50–75 % выборки). Еще одна подобная перестройка отмечается в вохминское время и, возможно, отражает глобальные изменения непосредственно на границе перми и триаса.

4. В поздней перми одним из источников сноса Московского бассейна являлся терригенный комплекс, породы которого испытали относительно низкотемпературное наложенное воздействие в венд-кембрийское время около 500–600 млн лет назад в связи с

тектономагматическими процессами становления и развития тиманид-протоуральид.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы искренне признательны В.П. Ковачу, Е.В. Адамской, Т.И. Головановой и М.Н. Савельевой за проведенные аналитические исследования; К.Г. Ерофеевой, Н.Б. Кузнецову, Т.В. Романюк и В.И. Паверману – за конструктивную критику и 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

Andersen T., Kristoffersen M., Elburg M.A., 2016. How Far Can We Trust Provenance and Crustal Evolution Information from Detrital Zircons? A South African Case Study. *Gondwana Research* 34, 129–148. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.03.003>.

Arefiev M.P., 2016a. Ideal Cyclite of a Compensated Trough and the Cyclicity Nature of the Permian-Triassic Red Beds of the East European Platform. In: *Sedimentary Complexes of the Urals and Adjacent Regions and Their Mineralogy. Proceedings of XI Ural Lithological Meeting (October 17–19, 2016)*. IGG UB RAS Publishing House, Ekaterinburg, p. 22–24 (in Russian) [Арефьев М.П. Идеальный циклит компенсированного прогиба и природа цикличности красноцветной пермо-триасовой формации Восточно-Европейской платформы // Осадочные комплексы Урала и прилегающих регионов и их минералогия: Материалы XI Уральского литологического совещания (17–19 октября 2016 г.). Екатеринбург: Изд-во ИГГ УрО РАН, 2016. С. 22–24].

Arefiev M.P., 2016b. Isotope-Geochemical Characteristics ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$) of the Continental Permian-Triassic Sequences of the East European Platform: Paleogeographic Restructuring in the Light of Global Climate Trends. In: *Unique Lithological Objects Through the Prism of Their Diversity. Proceedings of 2nd School of Students, Graduate Students and Young Scientists in Lithology (October 21–24, 2016)*. IGG UB RAS Publishing House, Ekaterinburg, p. 12–18 (in Russian) [Арефьев М.П. Изотопно-геохимическая характеристика ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$) континентальных пермо-триасовых отложений Восточно-Европейской платформы: палеогеографическая перестройка в свете глобальных климатических трендов // Уникальные литологические объекты через призму их разнообразия: Материалы 2-й Всероссийской

школы студентов, аспирантов и молодых ученых по литологии (21–24 октября 2016 г.). Екатеринбург: Изд-во ИГГ УрО РАН, 2016. С. 12–18].

Arefiev M.P., Golubev V.K., Balabanov Yu.P., Karasev E.V., Minikh A.V., Minikh M.G., Molostovskaya I.I., Yaroshenko O.P., Zhokina-Naumcheva M.A., 2015. Type and Reference Sections of the Permian–Triassic Continental Sequences of the East European Platform: Main Isotope, Magnetic, and Biotic Events. Proceedings of XVIII International Congress on Carboniferous and Permian. Sukhona and Severnaya Dvina Rivers Field Trip (August 4–10, 2015). PIN RAS, Moscow, 104 p.

Arefiev M.P., Golubev V.K., Karasev E.V., Kuleshov V.N., Pokrovsky B.G., Shkursky B.B., Yaroshenko O.P., Grigorieva A.V., 2016a. Paleontology, Sedimentology and Geochemistry of Terminal Permian in Northeastern Part of Moscow Syncline. 2. Lower Stream of Yug River. Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Geological Series 91 (2–3), 47–62 (in Russian) [Арефьев М.П., Голубев В.К., Карасев Е.В., Кулешов В.Н., Покровский Б.Г., Шкурский Б.Б., Ярошенко О.П., Григорьева А.В. Комплексная палеонтологическая, седиментологическая и геохимическая характеристика терминальных отложений пермской системы северо-восточного борта Московской синеклизы. Статья 2. Нижнее течение р. Юг // Бюллетень МОИП. Отдел геологический. 2016. Т. 91. Вып. 2–3. С. 47–63].

Arefiev M.P., Golubev V.K., Kuleshov V.N., Kukhtinov D.A., Minikh A.V., Pokrovsky B.G., Silantiev V.V., Urazaeva M.N., Shkursky B.B., Yaroshenko O.P., Grigorieva A.V., Naumcheva M.A., 2016b. Paleontology, Sedimentology and Geochemistry of the Terminal Permian in Northeastern Part of Moscow Syncline. 1. Malaya Severnaya Dvina River Basin. Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Geological Series 91 (1), 24–49 (in Russian) [Арефьев М.П., Голубев В.К., Карасев Е.В., Кулешов В.Н., Покровский Б.Г., Шкурский Б.Б., Ярошенко О.П., Григорьева А.В. Комплексная палеонтологическая, седиментологическая и геохимическая характеристика терминальных отложений пермской системы северо-восточного борта Московской синеклизы. Статья 1. Бассейн реки Малая Северная Двина // Бюллетень МОИП. Отдел геологический. 2016. Т. 91. № 1. С. 24–49].

Arefiev M.P., Golubev V.K., Naumcheva M.A., 2017. Preliminary Correlation of the Permian and Triassic Boundary Rocks in the Yug and Vetluga Basins. In: A.S. Alekseev (Ed.), Paleostrat-2017. Annual Meeting (Scientific Conference) of the Paleontology Section of the Moscow Society of Naturalists and the Moscow Branch of the Paleontological Society at the Russian Academy of Sciences (January 30 – February 1, 2017). Abstracts. PIN RAS, Moscow, p. 6–7 (in Russian) [Арефьев М.П., Голубев В.К., Наумчева М.А. Предварительная корреляция пограничных отложений перми и триаса в бассейнах Юга и Ветлуги // Палеострат-2017. Годичное собрание (научная конференция) секции палеонтологии МОИП и Московского отделения Палеонтологического общества при РАН (30 января – 1 февраля 2017 г.): Тезисы докладов / Ред. А.С. Алексеев. М.: Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка РАН, 2017. С. 6–7].

Bingen B., Viola G., Möller C., Vander Auwera J., Laurent A., Yi K., 2021. The Sveconorwegian Orogeny. Gondwana Research 90, 273–313. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2020.10.014>.

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>.

Chistyakova A.V., Veselovskiy R.V., Semenova D.V., Kovach V.P., Adamskaya E.V., Fetisova A.M., 2020. Stratigraphic Correlation of Permian–Triassic Red Beds, Moscow Basin, East European Platform: First Detrital Zircon U–Pb Dating Results. Doklady Earth Sciences 492, 306–310. <https://doi.org/10.1134/S1028334X20050062>.

Daly J.S., Balagansky V.V., Timmerman M.J., Whitehouse M.J., 2006. The Lapland-Kola Orogen: Palaeoproterozoic Collision and Accretion of the Northern Fennoscandian Lithosphere. Geological Society of London, Memoirs 32, 579–598. <https://doi.org/10.1144/GSL.MEM.2006.032.01.35>.

Fershtater G.B., 2013. Paleozoic Intrusive Magmatism of the Middle and South Urals. Publishing House of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, 368 p. (in Russian) [Фершта-тер Г.Б. Палеозойский интрузивный магматизм Среднего и Южного Урала. Екатеринбург: Изд-во УРО РАН, 2013. 368 с.].

Fetisova A.M., Balabanov Yu.P., Veselovsky R.V., Mamontov D.A., 2018. Anomalous Magnetization of the Permian-Triassic Nedubrovo Red Beds, Moscow Basin. Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences 63 (4), 544–560 (in Russian) [Фетисова А.М., Балабанов Ю.П., Веселовский Р.В., Мамонтов Д.А. Аномальная намагниченность красноцветов недубровской пачки пограничных пермо-триасовых отложений Русской плиты // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2018. Т. 63. № 4. С. 544–560]. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2018.409>.

Fetisova A.M., Golubev V.K., Veselovskiy R.V., Balabanov Yu.P., 2022. Paleomagnetism and Magnetostratigraphy of Permian-Triassic Reference Sections in the Central Russian Plate: Zhukov Ravine, Slukino, and Okskiy Siyezd. Russian Geology and Geophysics 63 (10), 1162–1176. <https://doi.org/10.2113/RGG20214336>.

Golubev V.K., 2016. Regional Stratigraphic Scheme of the Permian System of the East European Platform: Current State and Problems. In: State of the Stratigraphic Base of the Center and Southeast of the East European Platform. Proceedings of Meeting (November 23–25, 2015). VNIGRI, Moscow, p. 72–79 (in Russian) [Голубев В.К. Региональная стратиграфическая схема пермской системы Восточно-Европейской платформы: современное состояние и проблемы // Состояние стратиграфической базы центра и юго-востока Восточно-Европейской платформы: Материалы совещания (23–25 ноября 2015 г.). М.: ВНИГРИ, 2016. С. 72–79].

Golubev V.K., 2019. Permian-Triassic Boundary Stratigraphy of the East European Platform. The State of the Art:

No Evidence for a Major Temporal Hiatus. Permophiles: Newsletter of Subcommission on Permian Stratigraphy 67, p. 33–36.

Golubev V.K., Minikh A.V., Balabanov Yu.P., Kukhtinov D.A., Sennikov A.G., Minikh M.G., 2012. Reference Section of the Permian and Triassic in the Zhukov Ravine near the City of Gorokhovets, Vladimir Region. Bulletin of the Regional Interdepartmental Stratigraphic Commission for the Center and South of the Russian Platform 5, 49–82 (in Russian) [Голубев В.К., Миних А.В., Балабанов Ю.П., Кухтинов Д.А., Сенников А.Г., Миних М.Г. Опорный разрез перми и триаса в Жуковом овраге у г. Гороховец, Владимирская область // Бюллетень Региональной межведомственной стратиграфической комиссии по центру и югу Русской платформы. 2012. Вып. 5. С. 49–82].

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

Guynn J., Gehrels G., 2010. Comparison of Detrital Zircon Age Distribution Using the K-S Test Visualization and Representation of Age-Distribution Data Histograms. Available from: <https://sites.google.com/laserchron.org/azonalaserchroncenter/home> (Last Accessed January 18, 2023).

Härtel B., Jonckheere R., Wauschkuhn B., Ratschbacher L., 2021. The Closure Temperature(s) of Zircon Raman Dating. Geochronology 3 (1), 259–272. <https://doi.org/10.5194/gchron-3-259-2021>.

Horstwood M.S.A., Kosler J., Gehrels G., Jackson S.E., McLean N.M., Paton Ch., Pearson N.J., Sircombe K., Sylvester P., Vermeesch P., Bowring J.F., Condon D.J., Schoene B., 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>.

Hoskin P.W.O., Schaltegger U., 2003. The Composition of Zircon and Igneous and Metamorphic Petrogenesis. Reviews in Mineralogy and Geochemistry 53 (1), 27–62. <https://doi.org/10.2113/0530027>.

Ivakhnenko M.F., 2001. Tetrapods of the East European Plakkat – the Late Paleozoic Territorial-Natural Complex. Perm, 200 p. (in Russian) [Ивахненко М.Ф. Тетраподы Восточно-Европейского плакката – позднепалеозойского территориально-природного комплекса. Пермь, 2001. 200 с.].

Kaulina T.V., Lyalina L.M., Nerovich L.I., Avedisyan A.A., Il'chenko V.L., Bocharov V.N., Nitkina E.A., 2017. Processes of Hydrothermal Change in Zircon as Manifestation of Uranium Geochemistry in Rocks (A Case Study of Skalnoye Uranium Ore Occurrence in Litsa Region, Kola Peninsula). Bulletin of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences 3, 54–63 (in Russian) [Каулина Т.В., Лялина Л.М., Нерович Л.И., Аведисян А.А., Ильченко В.Л., Бочаров В.Н., Ниткина Е.А. Процессы гидротермального изменения

в цирконе как отражение геохимии урана в породах (на примере уранового рудопоявления Скальное Лицевского района Кольского полуострова) // Вестник КНЦ РАН. 2017. № 3. С. 54–63].

Kiselev D.N., Baranov V.N., Muravin E.S. et al., 2012. Geosites of the Yaroslavl Area: Stratigraphy, Paleontology, Paleogeography. Yustitsinform, Moscow, 304 p. (in Russian) [Киселев Д.Н., Баранов В.Н., Муравин Е.С. и др. Объекты геологического наследия Ярославской области: стратиграфия, палеонтология и палеогеография. М.: Юстицинформ, 2012. 304 с].

Kuleshov V.N., Arefiev M.P., Pokrovsky B.G., 2019. Isotope Characteristics ($\delta^{13}\text{C}$, $\Delta^{18}\text{O}$) of Continental Carbonates from Permian – Triassic Rocks in the Northeastern Russian Plate: Paleoclimatic and Biotic Reasons and Chemostratigraphy. Lithology and Mineral Resources 54, 489–510. <https://doi.org/10.1134/S0024490219060075>.

Kuznetsov N.B., Belousova E.A., Alekseev A.S., Romanyuk T.V., 2014a. New Data on Detrital Zircons from the Sandstones of Lower Cambrian Brusov Formation (White-Sea Region, East-European Craton): Unraveling the Timing of the Onset of the Arctida-Baltica Collision. International Geology Review 56 (16), 1945–1963. <https://doi.org/10.1080/00206814.2014.977968>.

Kuznetsov N.B., Meert J.G., Romanyuk T.V., 2014b. Ages of the Detrital Zircons (U/Pb, La-ICP-MS) from Latest Neoproterozoic – Middle Cambrian(?) Asha Group and Early Devonian Takaty Formation, the South-Western Urals: A Testing of an Australia-Baltica Connection within the Rodinia. Precambrian Research 244, 288–305. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2013.09.011>.

Linnemann U., Ouzegane K., Drareni A., Hofmann M., Becker S., Gärtner A., Sagawe A., 2011. Sands of West Gondwana: An Archive of Secular Magmatism and Plate Interactions – A Case Study from the Cambro-Ordovician Section of the Tassili Ouan Ahaggar (Algerian Sahara) Using U-Pb-LA-ICP-MS Detrital Zircon Ages. Lithos 123 (1–4), 188–203. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.01.010>.

Lozovsky V.R., Balabanov Y.P., Karasev E.V., Novikov I.V., Ponomarenko A.G., Yaroshenko O.P., 2016. The Terminal Permian in European Russia: Vyaznikovian Horizon, Nedubrovo Member, and Permian–Triassic Boundary. Stratigraphy and Geological Correlation 24, 364–380. <https://doi.org/10.1134/S0869593816040043>.

Lozovsky V.R., Esaulova N.K. (Ed.), 1998. The Permian-Triassic Boundary in the Continental Series of Eastern Europe. In: Upper Permian Stratotypes of the Volga Region. Proceedings of the International Symposium. GEOS, Moscow, 246 p. (in Russian) [Граница перми и триаса в континентальных сериях Восточной Европы // Верхнепермские стратотипы Поволжья: Материалы к Международному симпозиуму / Ред. В.Р. Лозовский, Н.К. Есаулова. М.: ГЕОС, 1998. 246 с].

Lozovsky V.R., Novikov I.V., 2016. Stratigraphic Scheme of the Triassic of Moscow and Mezen Synclises: State-of-Art and Problems. In: State of the Stratigraphic Base of the Center and Southeast of the East European Platform. Proceedings of Meeting (November 23–25, 2015). VNIGRI, Moscow,

р. 80–87 (in Russian) [Лозовский В.Р., Новиков И.В. Стратиграфическая схема триасовых отложений Московской и Мезенской синеклиз: состояние и проблемы // Состояние стратиграфической базы центра и юго-востока Восточно-Европейской платформы: Материалы совещания (23–25 ноября 2015 г.). М.: ВНИГРИ, 2016. С. 80–87].

Mints M.V., 2017. Meso-Neoproterozoic Grenville-Sveconorwegian Intracontinental Orogen: History, Tectonics, Geodynamics. *Geodynamics & Tectonophysics* 8 (3), 619–642 (in Russian) [Минц М.В. Мезо-неопротерозойский Гренвилл-Свеконорвежский внутриконтинентальный ороген: история, тектоника, геодинамика // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 3. С. 619–642]. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-3-0309>.

Nasdala L., Wenzel M., Vavra G., Irmer G., Wenzel T., Kober B., 2001. Metamictisation of Natural Zircon: Accumulation versus Thermal Annealing of Radioactivity-Induced Damage. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 141, 125–144. <https://doi.org/10.1007/s004100000235>.

Pastor-Galán D., Nance R.D., Murphy J.B., Spencer C.J., 2019. Supercontinents: Myths, Mysteries, and Milestones. *Geological Society of London Special Publications* 470 (1), 39–64. <https://doi.org/10.1144/SP470.16>.

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>.

Petrov O.V. (Ed.), 2012. Geological Map of Russia and Adjacent Water Areas. Scale 1:2500000. VSEGEI Publishing House, Saint Petersburg (in Russian) [Геологическая карта России и прилегающих акваторий. Масштаб 1:2500000 / Ред. О.В. Петров. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2012].

Pidgeon R.T., 2014. Zircon Radiation Damage Ages. *Chemical Geology* 367, 13–22. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.12.010>.

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 Cisurals (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.].

Pystin A.M., Ulyasheva N.S., Pystina Y.I., Grakova O.V., 2020. Provenance and U-Pb Age of Detrital Zircons from

the Upper Proterozoic Deposits of the Polar Urals: To the Question of the Time of Formation of the Timan Passive Margin. *Stratigraphy and Geological Correlation* 28 (5), 457–478. <https://doi.org/10.1134/S0869593820050081>.

Resentini A., Andò S., Garzanti E., Malusà M.G., Pastore G., Vermeesch P., Chanvry E., Dall'Asta M., 2020. Zircon as a Provenance Tracer: Coupling Raman Spectroscopy and U-Pb Geochronology in Source-To-Sink Studies. *Chemical Geology* 555, 119828. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.119828>.

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>.

Soboleva A.A., Kuznetsov N.B., Miller E.L., Udoratina O.V., Gehrels G., Romanyuk T.V., 2012. First Results of U-Pb Dating of Detrital Zircons from Basal Horizons of Uralides (Polar Urals). *Doklady Earth Sciences* 445, 962–968. <https://doi.org/10.1134/S1028334X12080156>.

Strok N.I., Trofimova I.S., 1976. Influence of the Ural and Baltic Provenances on the Formation of the Upper Permian and Lower Triassic Sequences of the Moscow Syncline. *Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Geological Series* 51 (1), 100–110 (in Russian) [Строк Н.И., Трофимова И.С. Влияние уральской и балтийской питающих провинций на формирование верхнепермских и нижнетриасовых отложений Московской синеклизы // Бюллетень МОИП. Отдел геологический. 1976. Т. 51. № 1. С. 100–110].

Vermeesch P., 2013. Multi-Sample Comparison of Detrital Age Distributions. *Chemical Geology* 341, 140–146. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.01.010>.

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>.

Veselovskiy R.V., Dubinya N.V., Ponomarev A.V., Fokin I.V., Patonin A.V., Pasenko A.M., Fetisova A.M., Matveev M.A., Afinogenova N.A., Rud'ko D.V., Chistyakova A.V., 2022. Shared Research Facilities "Petrophysics, Geomechanics and Paleomagnetism" of the Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (2), 0579 (in Russian) [Веселовский Р.В., Дубиня Н.В., Пономарев А.В., Фокин И.В., Патонин А.В., Пасенко А.М., Фетисова А.М., Матвеев М.А., Афиногенова Н.А., Рудько Д.В., Чистякова А.В. Центр коллективного пользования Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН «Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм» // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13. № 2. 0579.]. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0579>.