



PROVENANCE OF THE BOEVAYA GORA SECTION (SOUTHERN CIS-URALS) AT THE PERMIAN-TRIASSIC BOUNDARY AS A CONSEQUENCE OF THE PALEO-URALS EVOLUTION

A.V. Chistyakova ^{1,2✉}, R.V. Veselovskiy ^{1,2}, V.K. Golubev ^{3,4}, E.V. Adamskaya ⁵, V.P. Kovach ⁵

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

⁴ Kazan Federal University, 18 Kremlyovskaya St, Kazan 420008, Russia

⁵ Institute of Precambrian Geology and Geochronology, Russian Academy of Sciences, 2 Makarova Emb, Saint Petersburg 199034, Russia

ABSTRACT. On one hand, heavy minerals of terrigenous rocks make it possible to obtain unique information on configuration of the direction of clastic sediment transport into the basin and on the other to reconstruct the time for erosion of petrocomplexes of the provenances. In order to reconstruct the paleogeographic setting of the Southern Cis-Urals and the orogenic evolution of the Paleo-Urals at the Permian-Triassic boundary, the authors evaluated the composition and stability of the provenances for the Permian-Triassic terrigenous rocks of the Boevaya Gora section (Orenburg region) based on the analysis of the heavy minerals – zircon and garnet. Heavy mineral samples were taken from sandstones of three stratigraphic levels: Upper Permian, Lower Triassic, and paleontologically barren interval in the immediate vicinity of the Permian-Triassic boundary. The results of U-Pb LA-ICP-MS dating of detrital zircon and analysis of garnet end-members proportions have shown that the provenances covered the petrocomplexes of the tectonic zones of the Ural fold-belt – Uraltau, Main Uralian fault and Magnitogorsk, which allows reconstructing the Paleo-Urals orogen main-watershed axis position at the Permian-Triassic boundary east of that of the present day. It is shown that the source areas near the Boevaya Gora section remained stable during the whole time of accumulation of the studied part of the section. This conclusion is confirmed by the results of measuring the anisotropy of magnetic susceptibility in the studied rocks, which also suggest the strengthening of hydrodynamic regime in the terminal Permian and predominantly meridional direction of the clastic sediment transport.

KEYWORDS: Upper Permian; Lower Triassic; Southern Cis-Urals; detrital zircon; U-Pb LA-ICP-MS dating; garnet end-members; provenance

FUNDING: The study was performed as part of the state research project of the IPE RAS and Geological faculty of the Lomonosov Moscow State University.



EDN: MZYVTH

RESEARCH ARTICLE

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

Received: September 14, 2024

Revised: December 10, 2024

Accepted: December 13, 2024

FOR CITATION: Chistyakova A.V., Veselovskiy R.V., Golubev V.K., Adamskaya E.V., Kovach V.P., 2025. Provenance of the Boevaya Gora Section (Southern Cis-Urals) at the Permian-Triassic Boundary as a Consequence of the Paleo-Urals Evolution. *Geodynamics & Tectonophysics* 16 (1), 0809. doi:10.5800/GT-2025-16-1-0809

Supplementary files: [Chistyakova_et_al_2025_Suppl-1.xlsx](#), [Chistyakova_et_al_2025_Suppl-2.xlsx](#)

СОСТАВ ПИТАЮЩИХ ПРОВИНЦИЙ РАЗРЕЗА БОЕВАЯ ГОРА (ЮЖНОЕ ПРЕДУРАЛЬЕ) НА РУБЕЖЕ ПЕРМИ И ТРИАСА КАК ОТРАЖЕНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ПАЛЕОУРАЛЬСКОГО ОРОГЕНА

А.В. Чистякова^{1,2}, Р.В. Веселовский^{1,2}, В.К. Голубев^{3,4}, Е.В. Адамская⁵, В.П. Ковач⁵

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

⁴ Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Казань, ул. Кремлевская, 18, Россия

⁵ Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, 199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 2, Россия

АННОТАЦИЯ. Минералы тяжелой фракции терригенных пород позволяют, с одной стороны, получать уникальную информацию о конфигурации направлений переноса обломочного материала в бассейн седиментации, а с другой – реконструировать время выведения петрокомплексов на эрозионный уровень в области питающих провинций. С целью восстановления палеогеографической обстановки Южного Предуралья и развития Палеоуральского орогена в пограничное пермско-триасовое время авторами была выполнена оценка состава и стабильности питающих провинций для пермско-триасовых терригенных пород разреза Боевая Гора (Оренбургская область) на базе анализа минералов тяжелой фракции – циркона и граната. Пробы для выделения тяжелой фракции были отобраны из песчаников трех стратиграфических уровней: верхнепермского, нижнетриасового, а также из палеонтологически немого интервала непосредственно вблизи границы перми и триаса. Результаты U-Pb LA-ICP-MS датирования обломочного циркона и анализа минерального состава минералов группы граната показали, что в область питающих провинций были вовлечены петрокомплексы тектонических зон Уральского складчатого пояса: Уралтау, Главного Уральского разлома и Магнитогорской, что позволяет реконструировать положение оси главного водораздела Палеоуральского орогена на рубеже перми и триаса восточнее современного. Показано, что источники сноса обломочного материала в район разреза Боевая Гора оставались стабильными в течение времени накопления изученной части разреза. Этот вывод подтверждается результатами измерения анизотропии магнитной восприимчивости исследованных пород, которые также позволяют предположить усиление гидродинамического режима в терминальной перми и преимущественно меридиональный характер направления сноса обломочного материала.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: верхняя пермь; нижний триас; Южное Предуралье; детритовый циркон; U-Pb LA-ICP-MS датирование; минеральный состав граната; питающие провинции

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследования выполнены в рамках темы НИР государственного задания ИФЗ РАН и геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

1. ВВЕДЕНИЕ

Терригенные породы исключительно информативны в контексте решения широкого спектра задач современной геологии, затрагивающих вопросы реконструкции тектонических обстановок и палеогеографии, стратиграфической корреляции, а также непосредственно связанных с оценкой углеводородного потенциала осадочных бассейнов и поиском месторождений рудных полезных ископаемых. Одним из ключевых компонентов подобных реконструкций является анализ минералов тяжелой фракции, который позволяет охарактеризовать проксимальные (ближние) и дистальные (дальние) источники сноса, оценить степень рециклированности материала, установить время выведения комплексов определенного состава и возраста на уровень эрозионного среза, проследить эволюцию положения главных водоразделов. Особая роль в подобных исследованиях принадлежит U-Pb датированию обломочного циркона и титанита, а также изучению химических особенностей таких минералов, как турмалин, рутил, гранат.

Активное изучение минералогического состава пограничных пермско-триасовых терригенных комплексов Южного Предуралья было инициировано еще в середине прошлого века (например [Sarkisyan, Pokrovskaya, 1949]). Тем не менее исследования с привлечением изотопно-геохронологических и геохимических данных на настоящий момент достаточно фрагментарны, однако уже первые результаты U-Pb датирования обломочного циркона и изучения химического состава минералов группы граната и турмалина дают основания расширить представления о непростой палеогеографической картине рубежа перми и триаса на этой территории [Badida, Mizens, 2015; Maslov et al., 2016; Chistyakova et al., 2022].

Континентальные терригенные толщи терминальной перми и нижнего триаса Южного Предуралья могут рассматриваться как сложный многокомпонентный комплекс, питающие провинции которого характеризуются обширным и разнообразным петрофондом, отражающим длительную историю развития Уральского складчатого пояса. В этом интервале геологического

времени территория в районе разреза Боевая Гора, являющегося объектом настоящего исследования, представляла собой область осадконакопления в условиях обширной аллювиально-пролювиальной равнины [Tverdokhlebov et al., 2007].

По представлениям исследователей Южного Предуралья [Newell et al., 1999; Tverdokhlebov et al., 2002, 2005, 2007], вблизи рубежа пермского и триасового периодов отмечается активизация Уральского орогена, вызвавшая общее тектоническое воздымание складчатого пояса. Изменения в климатическом режиме в это время выразились, в первую очередь, в значительной гумидизации, что привело к увеличению объема стока поверхностных текучих вод. Отметим также, что непосредственное влияние развития Уральского орогена на терригенное осадконакопление в пределах Восточно-Европейской платформы было достаточно масштабным и отчетливо проявилось и на значительном удалении от орогена – в центральных районах Русской плиты (например [Kuleshov et al., 2019; Arefiev et al., 2016a, 2016b; Chistyakova et al., 2023]).

В настоящей работе отражены результаты изучения минералов тяжелой фракции из песчаников разреза Боевая Гора – одного из ключевых разрезов континентальных пермско-триасовых формаций Южного Предуралья. Цель исследования состояла в реконструкции и оценке стабильности питающих провинций в терминальной перми – раннем триасе на основе результатов U-Pb LA-ICP-MS датирования обломочного циркона, анализа химического состава граната, а также оценки количественного содержания наиболее характерных минералов тяжелой фракции.

2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разрез Боевая Гора расположен в юго-восточной части Волго-Уральской антеклизы в пределах Соль-Илецкого свода, приблизительно в 50 км к югу от г. Оренбурга и в 1.5 км севернее с. Боевая Гора (рис. 1). Это один из наиболее представительных пограничных пермско-триасовых разрезов Южного Предуралья, не первое десятилетие привлекающий внимание исследователей рубежа палеозоя и мезозоя [Tverdokhlebov et al., 2007; Surkov et al., 2007, 2009; Taylor et al., 2009; Sennikov et al., 2022; Fetisova et al., 2023a; и ссылки в данных работах]. В работах предшественников детально рассматривается литологическая, палеонтологическая и палеомагнитная характеристика разреза.

Для изучения минералов тяжелой фракции и, в первую очередь, U-Pb датирования обломочного циркона авторами были отобраны пробы песчаников из трех стратиграфических уровней; общий интервал опробования составил ~17 м (рис. 2, 3; табл. 1). Пробы BG-2 и BG-3 характеризуют нижнетриасовый (копанская свита) и верхнепермский (кульчумовская свита) интервалы соответственно. Отобранная в основании слоя 9 непосредственно вблизи границы перми и триаса проба BG-1 характеризует неоднозначный стратиграфический интервал. Слои 8 и 9 отличаются отсутствием фаунистических остатков и традиционно относятся к вохминскому горизонту (копанская свита) по литологическим признакам [Surkov et al., 2007, 2009]. Тем не менее подошва вохминского горизонта и, соответственно, копанской свиты может находиться выше по разрезу и отождествляться с границей слоев 7 и 8.

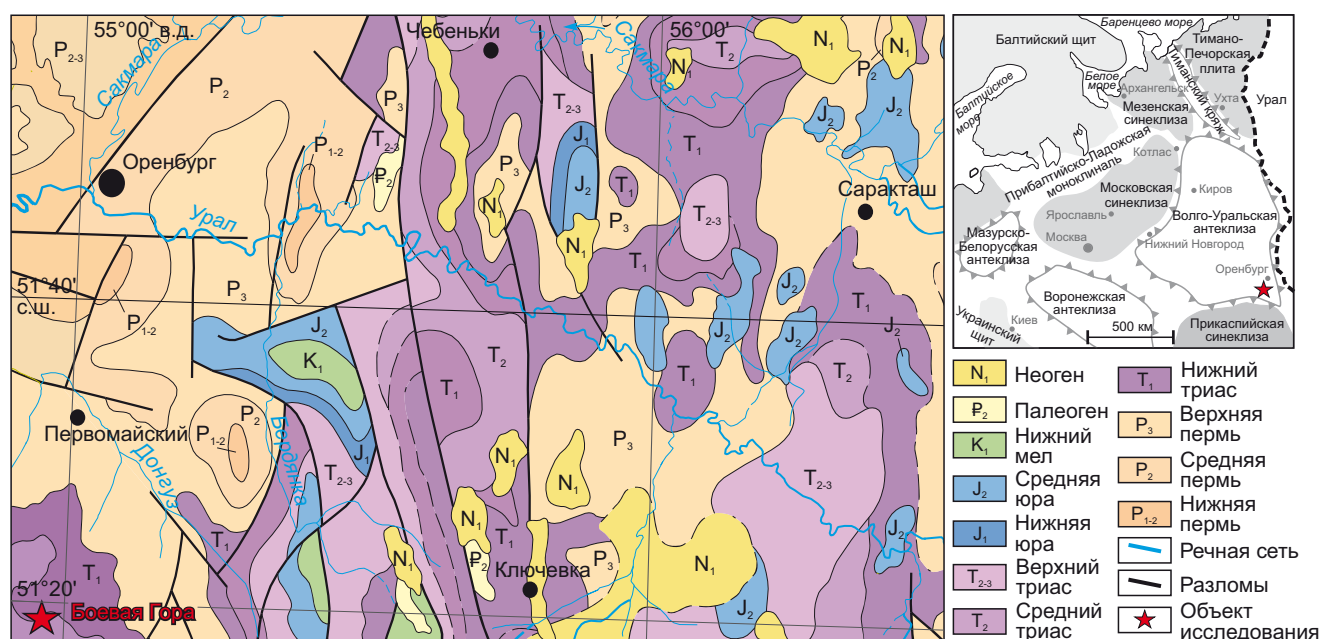


Рис. 1. Схема геологического строения Южного Предуралья (на основе [State Geological Map..., 2013]) (a) и положение разреза Боевая Гора на тектонической схеме Восточно-Европейской платформы (б).

Fig. 1. Geological scheme of the Southern Cis-Urals (based on [State Geological Map..., 2013]) (a) and the position of the Boevaya Gora section on the tectonic scheme of the East European Platform (b).

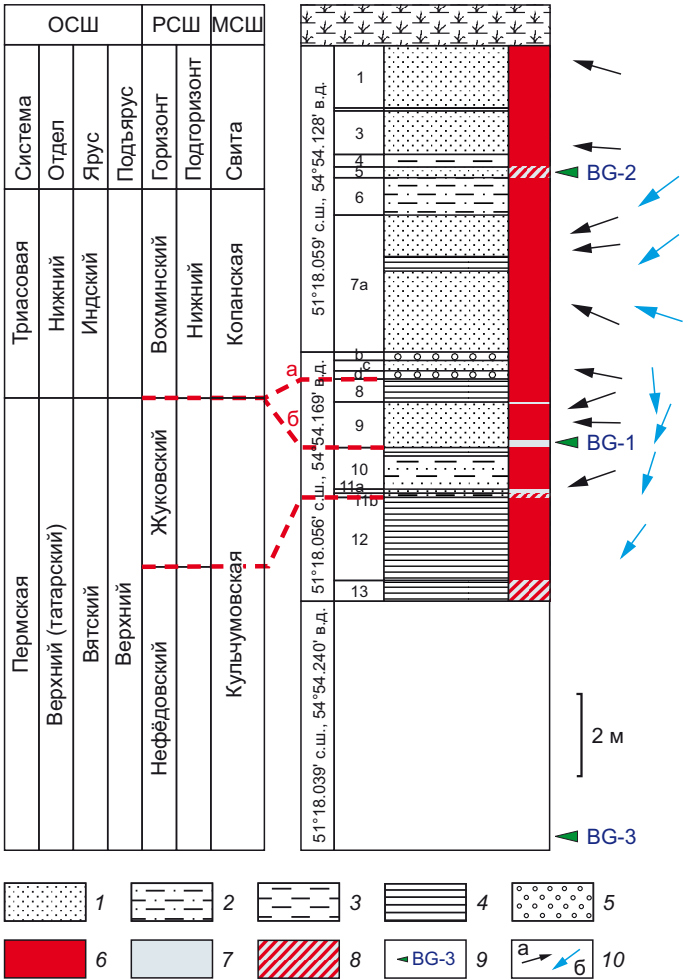


Рис. 2. Стратиграфическая схема разреза Боевая Гора с отмеченными уровнями отбора проб для датирования обломочного циркона (BG-1, BG-2, BG-3) и с указанием направлений палеотечений.

Положение границы кульчумовской и копанской свит: а – принятое в данной работе, б – традиционное. 1 – песчаник; 2 – алевролит; 3 – алевролит глинистый; 4 – глина; 5 – конгломерат; 6–8 – окраска пород: 6 – красная, 7 – серая, 8 – пестрая; 9 – уровни отбора проб на U-Pb датирование обломочного циркона; 10 – направление палеопотоков: а – по текстурным индикаторам [Surkov et al., 2007], б – по данным анизотропии магнитной восприимчивости (настоящее исследование).

Fig. 2. Stratigraphic scheme of the Boevaya Gora section with marked sampling levels for detrital zircon U-Pb dating (BG-1, BG-2, BG-3) and directions of paleocurrents.

Position of the boundary between the Kulchum and Kopansky formations: а – accepted here, б – traditional. 1 – sandstone; 2 – siltstone; 3 – clay siltstone; 4 – clay; 5 – conglomerate; 6–8 – color of rocks: 6 – red, 7 – grey, 8 – variegated; 9 – levels of sampling for U-Pb dating of detrital zircon; 10 – direction of paleocurrents: а – according to textural indicators [Surkov et al., 2007], б – according to the anisotropy of magnetic susceptibility (this study).

Таблица 1. Характеристика опробованных стратиграфических уровней разреза Боевая Гора

Table 1. Description of the sampled strata of the Boevaya Gora section

Проба	Координаты (с.ш., в.д.)	Стратиграфическая позиция	Описание
BG-2	51°18.059' 54°54.128'	Нижний триас, вохминский горизонт, копанская свита	Фиолетовые мелко- и среднезернистые крепкие тонкоплитчатые песчаники с горизонтально вытянутыми серыми прослоями и пятнами до 4–5 см. Мощность слоя 0.26–0.27 м
BG-1	51°18.056' 54°54.169'	Верхняя пермь, жуковский горизонт, кульчумовская свита	Зеленовато-серые среднезернистые горизонтально-слоистые песчаники. Мощность слоя в точке отбора 10 см. Вниз по оврагу песчаники становятся косослоистыми, а их мощность увеличивается до 25 см
BG-3 [Chistyakova et al., 2022]	51°18.039' 54°54.240'	Верхняя пермь, нефёдовский горизонт, кульчумовская свита, ~10 м ниже уровня отбора пробы BG-1	Зеленовато-серые средне- и мелкозернистые плотные песчаники

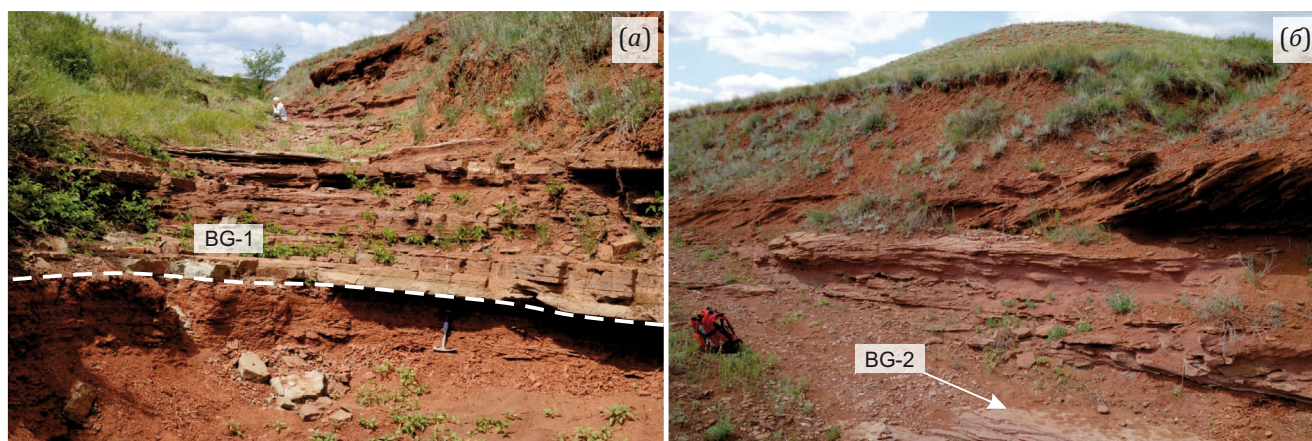


Рис. 3. Точки отбора проб в разрезе Боевая Гора: (а) – BG-1 (верхняя пермь), (б) – BG 2 (нижний триас). Пунктирной линией отмечена подошва слоя 9.

Fig. 3. Sampling sites of the Boevaya Gora section: (a) – BG-1 (Upper Permian), (б) – BG-2 (Lower Triassic). The dotted line marks the base of layer 9.

3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Выделение минералов тяжелой фракции по стандартным методикам с применением тяжелых жидкостей и электромагнитной сепарации проводилось в Институте геологии и геохронологии докембрия РАН (ИГГД РАН, г. Санкт-Петербург). Анализ минерального состава прозрачной части тяжелой фракции выполнялся с помощью бинокулярного микроскопа, а также рамановского спектрометра EnSpectr R532 к оптическому микроскопу Olympus BX53-M в ЦКП ИФЗ РАН [Veselovskiy et al., 2022]. Для каждой пробы были диагностированы несколько сотен зерен в размерной фракции $-0.25...+0.05$ и были выявлены характерные минералы, по соотношению которых возможно установление наличия закономерных изменений по разрезу. Сумма всех идентифицированных репрезентативных прозрачных минералов приравнивалась к 100 %, после чего вычислялась относительная доля каждого вида (группы).

Методика U-Pb датирования циркона из пробы BG-3 приведена в [Chistyakova et al., 2022]. Электронно-микроскопические и U-Th-Pb LA-ICP-MS геохронологические исследования циркона из проб BG-1 и BG-2 выполнены в ИГГД РАН по методике, детально описанной в работе [Kovach et al., 2023]. Измерения осуществлялись на масс-спектрометре Element XR, совмещенном с установкой для лазерной абляции NWR-213. Диаметр кратера абляции составлял 25 мкм. Калибровка производилась по стандартному циркону GJ-1 с конкордантным возрастом 601.9 ± 0.4 млн лет аттестованным методом CA-ID-TIMS [Horstwood et al., 2016]. Для контроля качества аналитических данных использованы стандартные цирконы Harvard 91500 и Plešovice, измерявшиеся дважды в каждой аналитической сессии из 12 неизвестных. Для этих стандартов получены

оценки возраста 1066 ± 5 млн лет (по $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$) и 336 ± 2 млн лет (по $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$) соответственно, совпадающие в пределах погрешности с оценками методом CA-ID-TIMS [Sláma et al., 2008; Horstwood et al., 2016]. Изотопные отношения рассчитывались в программе Glitter [Griffin et al., 2008], поправка на нерадиоогенный (обыкновенный) свинец вводилась с помощью программы ComPbCorr [Andersen, 2002], а расчет возрастов и визуализация результатов выполнялись в программе IsoplotR [Vermeesch, 2018]. Для дальнейшего анализа и графических построений использовались оценки изотопного возраста с дискордантностью¹ $|D| < 5\%$, 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. На основе соответствующих определений U-Pb возраста строились гистограммы и графики оценки плотности ядра (KDE, Kernel Density Estimation) с фиксированной полосой пропускания «30». Возраст наиболее молодой популяции циркона, интерпретируемый как максимальный возраст осадочной толщи (MDA – maximum depositional age), рассчитывался для группы зерен, оценки возраста по отношению $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ которых перекрываются на уровне 2σ [Dickinson, Gehrels, 2009], $|D| < 5\%$, $p(\chi^2) > 0.05$. Таблицы, содержащие все исходные результаты U-Pb LA-ICP-MS датирования обломочного циркона, приведены в Suppl. 1 на странице статьи онлайн.

Определение составов минералов группы граната осуществлялось с применением сканирующего электронного микроскопа Tescan MIRA IV LMS с энергодисперсионным спектрометром Ultim Max 65. Для расчета минерального состава применялись Excel-таблицы Make_mineral (Курдюков, Абрамов, ИГЕМ РАН, 2004), а дальнейшая обработка данных производилась по протоколу, предложенному в работе [Suggate, Hall, 2014].

¹ Расчет дискордантности производился по формуле $D = \{[\text{возраст}(^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb})] / [\text{возраст}(^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U})] - 1\} \cdot 100$.

Минальный состав граната был получен для 20–30 зерен из каждой пробы, что является достаточно представительной выборкой в свете методического исследования [Suggate, Hall, 2014]. Химический состав всех проанализированных зерен граната и результаты пересчета на минальный состав представлены в Suppl. 2 на странице статьи онлайн.

Измерения анизотропии магнитной восприимчивости (АМВ) кубических ориентированных образцов проводились в ЦКП ИФЗ РАН и в петромагнитной лаборатории геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова на каппабриджах MFK1-A и KLY-4S (AGICO) по стандартной методике; визуализация и статистическая обработка результатов выполнялись в программном обеспечении Anisofit 4.2 (AGICO).

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

4.1. Минералы тяжелой фракции

Изучение минералов тяжелой фракции было направлено на решение двух задач: выявление изменений в конфигурации сноса обломочного материала и характеристику состава питающих провинций.

Одними из самых многочисленных среди прозрачной части тяжелой фракции во всех исследуемых пробах являются титанит, гранат, эпидот, диопсид, циркон, апатит, рутил, анатаз и брукит. Эти минералы были выбраны в качестве репрезентативных, и для них было проведено статистическое сравнение их относительной доли в песчаниках верхней перми и нижнего триаса разреза Боевая Гора (табл. 2).

Согласно результату статистического анализа состава тяжелой фракции для трех изученных стратиграфических уровней разреза относительная доля десяти характерных минералов, обнаруженных в каждой из проб, варьируется в относительно узком интервале и не отражает принципиальных изменений в источниках сноса. Тем не менее наиболее контрастной оказалась нижнетриасовая проба BG-2, отличающаяся заметно более высокой долей содержания граната ан-

драдит-гроссулярового ряда, эпидота, рутила и анатаза, а также титанита, сопоставимое количество которого отмечается только в пробе BG-3. Проба BG-1 выделяется высоким процентным содержанием апатита.

Для всех изученных минералов в целом характерна слабая сохранность кристаллографических форм. Преимущественно это полуокатанные и окатанные обломки кристаллов, зачастую с неровной или ямчатой поверхностью. Эти признаки могут указывать, с одной стороны, на существенную удаленность питающих провинций, а с другой – на неоднократное переотложение (рециклирование) обломочного материала. В среднем степень окатанности зерен в нижнетриасовой пробе BG-2 заметно выше, чем в нижележащих песчаниках BG-1 и BG-3.

4.2. U-Th-Pb LA-ICP-MS датирование циркона

Распределения возрастов зерен обломочного циркона трех проб разреза Боевая Гора генерально очень похожи (рис. 4; Suppl. 1). В каждом из них отчетливо выделяются (а) раннедевонский (~400 млн лет) либо позднедевонский (~380 млн лет) возрастной максимум, (б) пик с модальным значением 530–540 млн лет и (в) популяция зерен с возрастом около 700 млн лет. В пробах BG-2 и BG-1 заметную роль также играет циркон рифейского возраста, популяция которого формирует наиболее интенсивный максимум на кривой KDE в интервале 1500–1600 млн лет. Циркон архейского возраста обнаружен в пробах BG-1 и BG-3 (до 8 % выборки), но отсутствует в нижнетриасовых песчаниках пробы BG-2.

Средневзвешенный возраст по отношению $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ группы самых молодых зерен циркона из нижнетриасовой пробы BG-2 определяется как среднекаменноугольный: 318 ± 4 млн лет (2σ), СКВО=2.1, $n=6$. В расположенной стратиграфически ниже пробе BG-1 возраст наиболее молодых зерен древнее и составляет 337 ± 6 млн лет (2σ), СКВО=1.5, $n=4$. В выборке зерен циркона, характеризующих верхнепермскую пробу

Таблица 2. Относительная доля некоторых характерных минералов прозрачной части тяжелой фракции

Table 2. Relative percentage of some representative minerals in the transparent heavy fraction

Минерал		Проба, %		
		BG-2	BG-1	BG-3
Титанит		40.78	26.07	38.08
Диопсид		4.65	26.70	24.99
Группа граната	Уграндиты	15.45	6.59	8.58
	Пиральспиты	3.32	4.48	3.81
Апатит		9.30	17.94	6.10
Циркон		3.41	8.76	8.11
Группа эпидота		8.97	3.71	4.77
Группа рутила	Рутил	7.39	4.70	3.96
	Анатаз	6.64	1.05	1.55
	Брукит	0.08	0.00	0.05

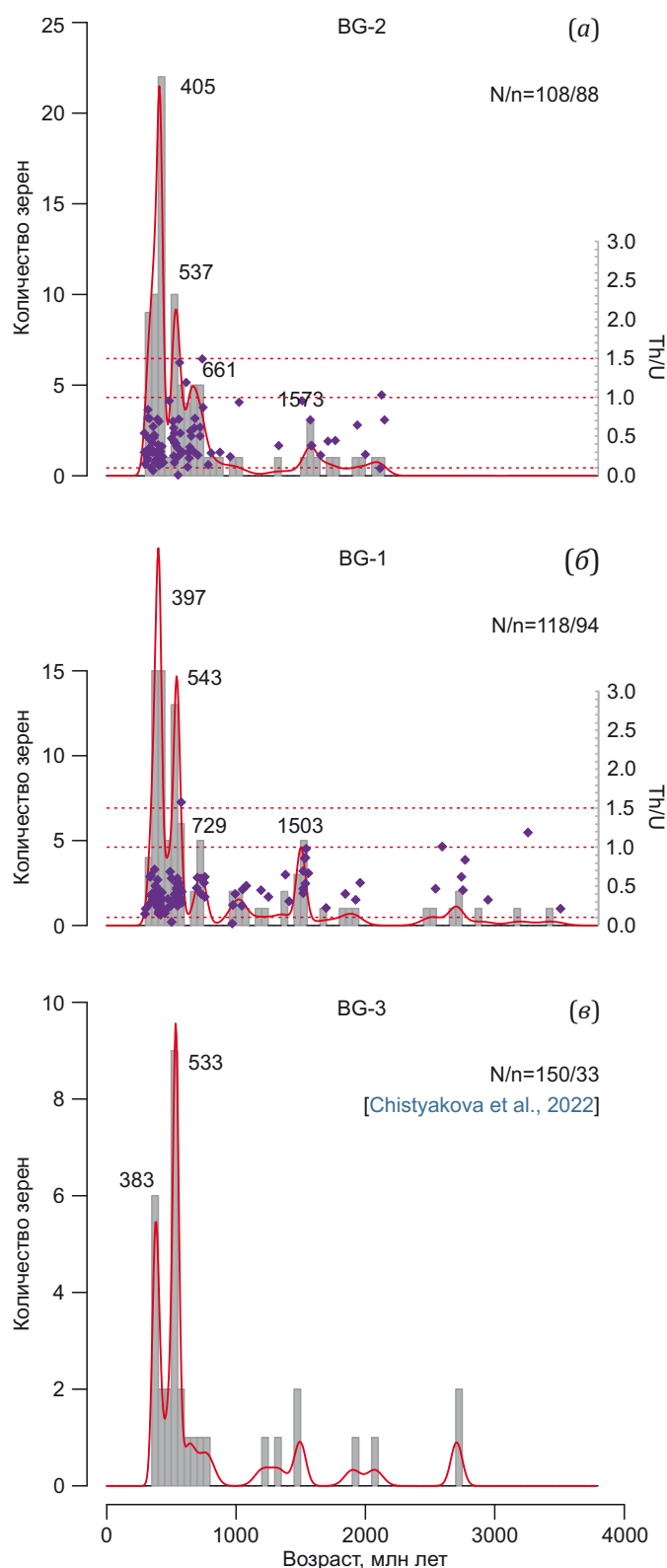


Рис. 4. Нормализованные распределения возрастов (гистограммы и кривые KDE), Th/U отношения и диаграммы с конкордией для зерен обломочного циркона разреза Боевая Гора.

N – общее количество датированных зерен, n – количество оценок изотопного возраста с $|D| < 5\%$. Модальные значения представительных пиков обозначены в миллионах лет. Граничные значения Th/U отношений обозначены по [Hoskin, Schaltegger, 2003; Linnemann et al., 2011].

Fig. 4. Normalized U-Pb age distributions (histograms and KDEs), Th/U ratios, and concordia plots for detrital zircon of the Boevaya Gora section.

N – a total number of dated grains; n – a number of isotope age estimates with $|D| < 5\%$. Modal values of representative peaks are in Ma. The boundary values of Th/U ratios are given according to [Hoskin, Schaltegger, 2003; Linnemann et al., 2011].

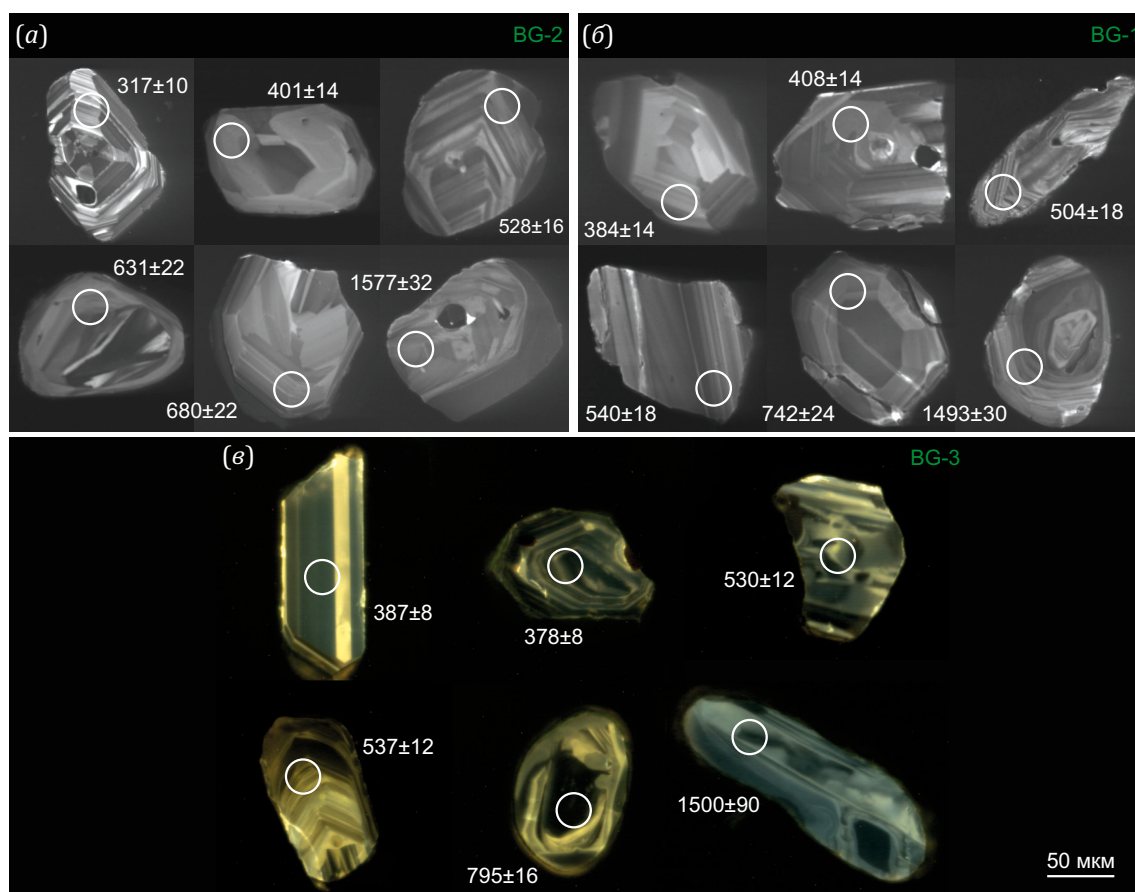


Рис. 5. Католюминесцентные изображения зерен циркона из проб BG-1 (а), BG-2 (б) и BG-3 (в), характерные для разных возрастных популяций. Погрешности определения возраста приведены на уровне 2σ .

Fig. 5. Cathodoluminescence images of zircon from samples BG-1 (a), BG-2 (б), and BG-3 (в) characteristic of different age populations. Age determination uncertainties are at $\pm 2\sigma$ level.

BG-3, популяция с возрастом около 380 млн лет является наиболее молодой.

Распределения возрастов зерен циркона в изученных пробах не в полной мере идентичны, однако критические различия в значениях максимумов и относительном вкладе возрастных популяций отсутствуют, что косвенно подтверждается статистическим K-S тестом (тест Колмогорова-Смирнова). Th/U отношения для подавляющего числа зерен циркона находятся в пределах интервала от 0.1 до 1.0, который, согласно [Hoskin, Schaltegger, 2003; Linnemann et al., 2011], характерен для циркона из магматических пород кислого и среднего состава (рис. 4).

Во всех изученных пробах преобладают (до 60 %) зерна циркона, которые имеют достаточно сложное внутреннее строение (рис. 5): для них характерны зоны перекристаллизации, нечеткие границы между зонами, а также каймы, срезающие ростовую зональность. Главным образом это специфика зерен с оценками возраста около 500 млн лет и древнее. Для остальной части (~40 %) всех зерен циркона отмечается отчетливая осцилляторная зональность, в некоторых случаях с элементами секториальной. Однородные в католюминесценции зерна единичны.

4.3. Минералы группы граната

С целью снижения неопределенности при интерпретации потенциальных источников обломочного материала и, в том числе, учета питающих провинций, не содержащих циркон, было проведено изучение химического состава минералов группы граната, обладающих значительно меньшей устойчивостью к разнообразным физико-химическим факторам, чем циркон [Berger, 1986].

Минералы группы граната являются типичным компонентом тяжелой фракции терригенных толщ и, в первую очередь, рассматриваются как признак присутствия метаморфических комплексов в областях источников сноса обломочного материала. Однако гранаты также встречаются в кислых магматических породах, кимберлитах и перидотитах. Высокая вариативность минерального состава гранатов позволяет использовать особенности их химического состава в качестве петрогенетических индикаторов.

Фигуративные точки составов гранатов из песчаников разреза Боевая Гора группируются на петрогенетических диаграммах в двух областях (рис. 6; Suppl. 2). Наиболее многочисленны (60–80 % выборки) гранатыgrossуляр-андрадитового ряда, попадающие в поле

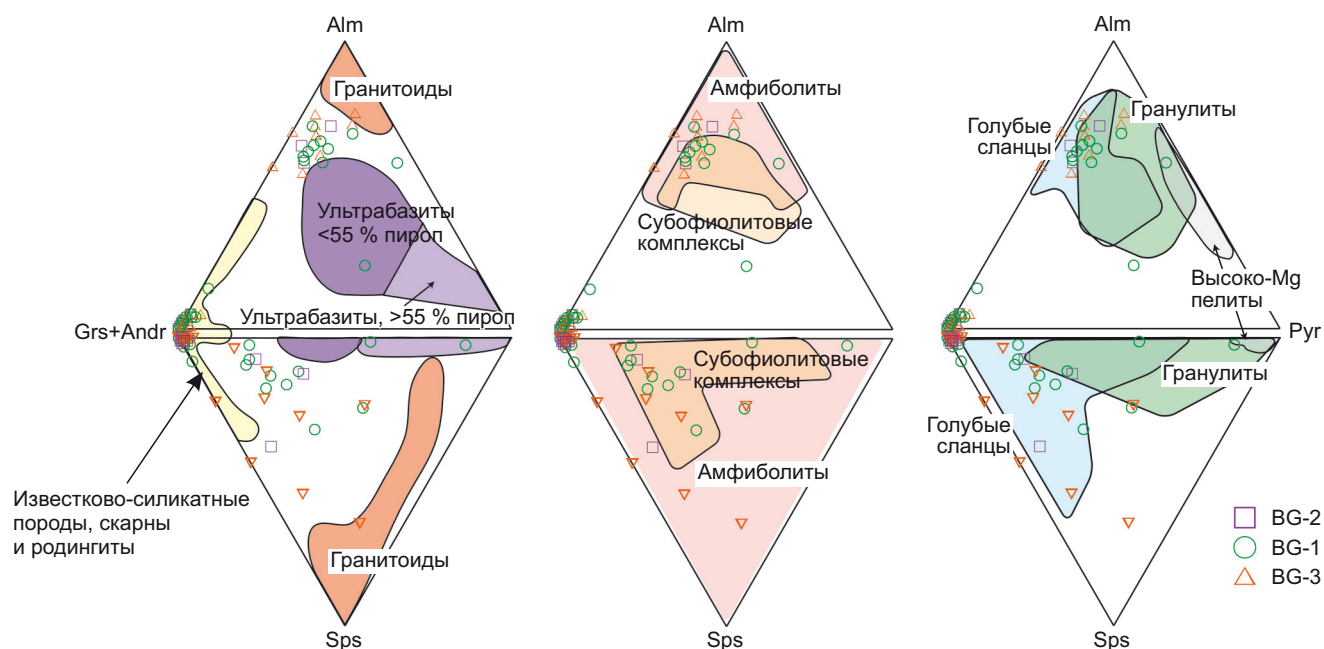


Рис. 6. Петрогенетические диаграммы составов минералов группы граната из песчаников разреза Боевая Гора. Поля выделены по [Suggate, Hall, 2014]. Миналы: Alm – альмандин, Grs – гроссуляр, Andr – андрадит, Sps – спессартин, Pyr – пироп.

Fig. 6. Petrogenetic diagrams of compositions of garnets from sandstones of the Boevaya Gora section. Fields are highlighted according to [Suggate, Hall, 2014]. Molecular end-members: Alm – almandine, Grs – grossular, Andr – andradite, Sps – spessartine, Pyr – pyrope.

контактово-метасоматических пород. До 40 % выборки составляют альмандины, фигуративные точки составов которых концентрируются в полях глаукофановых (голубых) сланцев и амфиболитов. Отмеченное распределение в равной степени характерно для всех опробованных стратиграфических уровней.

4.4. Анизотропия магнитной восприимчивости

Результаты реконструкции источников сноса обломочного материала в осадочный бассейн по минералам тяжелой фракции могут быть дополнены информацией, полученной по текстурам горных пород, характеризующим направление течения водного потока в процессе накопления осадков. При рассмотрении некоторого интервала разреза становится возможным проследить эволюцию направлений потока осадочного материала во времени. Традиционным методом определения направления и скорости последнего является анализ ряби на поверхностях напластования алевролитов и песчаников. Однако направление течения водного потока при накоплении терригенных осадков может также определяться по характеру магнитной текстуры горной породы путем измерения АМВ. В ходе палеомагнитных исследований, выполненных на разрезе Боевая Гора в 2019 г. [Fetisova et al., 2023a], измерения АМВ были произведены для слоев 6–12 (см. рис. 2), представленных фиолетово-коричневыми и красно-коричневыми разномерными песчаниками, глинами и алевролитами. Мощность опробованной части разреза составляет ~17 м, всего было

отобрано и проанализировано 152 ориентированных образца кубической формы.

Степень анизотропии магнитной восприимчивости (P) не превышает 14 %, а в среднем составляет 5–9 % (рис. 7). При этом большей степенью анизотропии обладают слои, сложенные алевролитами и глинами, что в целом характерно для мелкозернистых осадочных пород. При рассмотрении характера АМВ для каждого слоя отдельно (рис. 7) можно заключить, что направления минимальной (K3) и максимальной (K1) осей эллипсоида АМВ кучно сгруппированы: минимальные оси расположены субвертикально, а длинные оси в большинстве случаев ориентированы подобно друг другу и лежат в горизонтальной плоскости. Поскольку теория и практика петромагнитных исследований свидетельствуют о том, что для глин и мелкообломочных терригенных пород характер распределения осей эллипсоида АМВ является отражением направления течения водного потока и его динамики (например [Park et al., 2013]), полученные результаты могут быть интерпретированы соответствующим образом.

В верхнем интервале разреза в каждом из исследованных слоев направления длинных осей АМВ имеют относительно высокую кучность и ориентированы в направлении СВ–ЮЗ (слой 6), З–В (слой 7), С–Ю (слой 8), ССВ–ЮЮЗ (слои 9 и 10). В низах разреза (слой 12 и ниже) кучность максимальных и минимальных осей ниже, чем в верхней части разреза, однако преобладающее направление ССВ–ЮЮЗ определяется достаточно уверенно. Отметим, что результаты измерения

АМВ для слоя 11 получены лишь по четырем образцам и не согласуются друг с другом (в отличие, например, от верхней части слоя 7), поэтому мы воздерживаемся от их интерпретации.

Таким образом, магнитная текстура горных пород, слагающих пограничный пермско-триасовый интер-

вал разреза Боевая Гора, указывает на субмеридиональное направление сноса обломочного материала в позднепермское время, приобретающее более широтный (СВ-ЮЗ) характер в раннетриасовое (см. рис. 2; рис. 8). Заметим, что полученные нами данные лишь отчасти коррелируют с субширотными направлениями

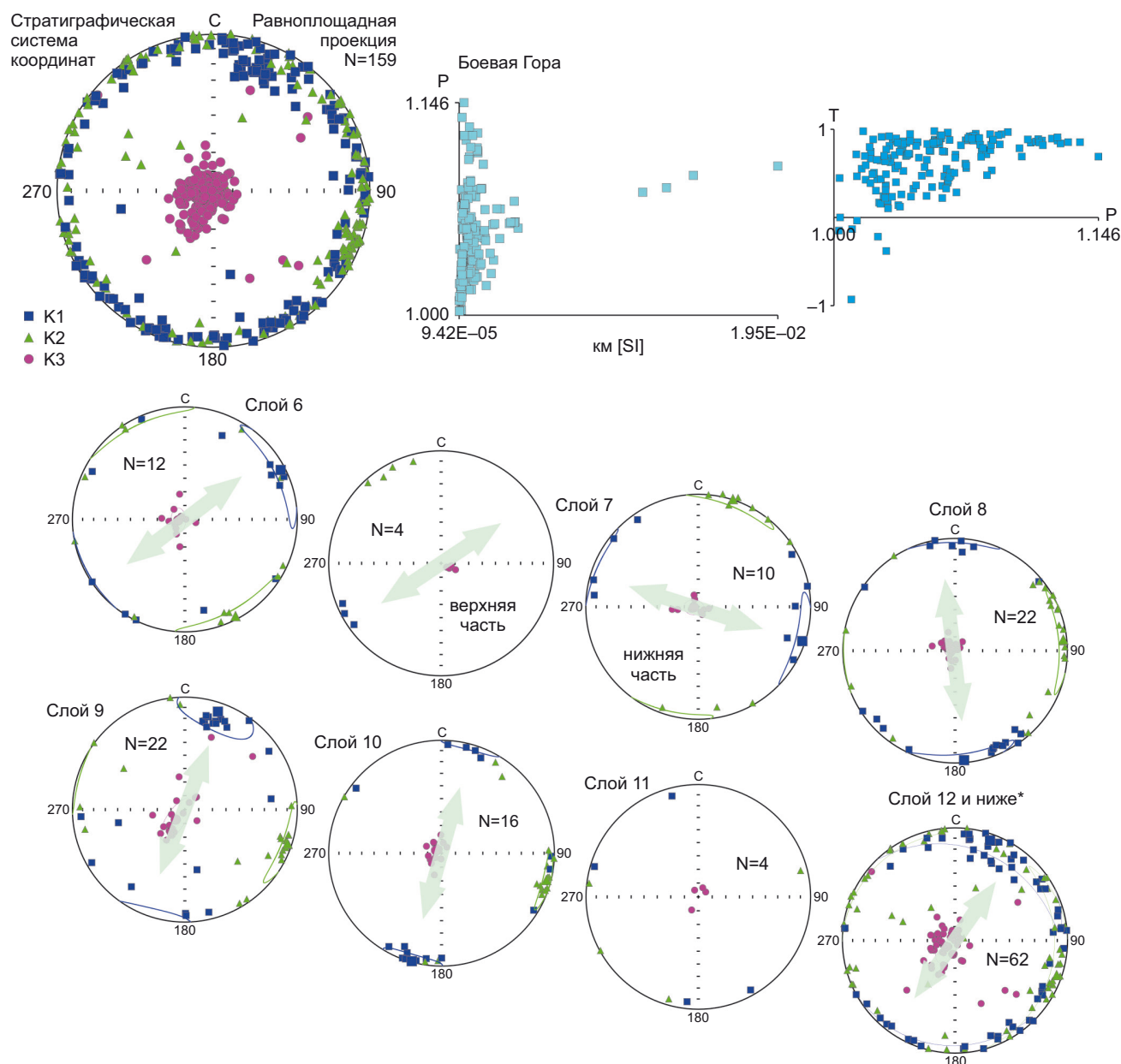


Рис. 7. Результаты послойного измерения анизотропии магнитной восприимчивости.

Стереогаммы иллюстрируют распределения длинной, промежуточной и короткой полуосей эллипсоида АМВ (K1, K2 и K3 соответственно) в проекции на нижнюю полусферу в стратиграфической системе координат; диаграмма Желинека, иллюстрирующая зависимость параметра формы эллипсоида АМВ (Т) от степени анизотропии (Р); зависимость Р от величины магнитной восприимчивости (Км). * – данные для слоя 12 хорошо согласуются с результатами измерения АМВ в образцах, отобранных из пород нефёдовского горизонта без строгой привязки по мощности, и интерпретировались совместно с ними.

Fig. 7. Results of layer-by-layer measurement of anisotropy of magnetic susceptibility.

Stereograms illustrate the distributions of long, intermediate and short semi-axes of the AMS ellipsoid (K1, K2 and K3, respectively) in projection on the lower hemisphere in the stratigraphic coordinate system; the Jelinek diagram illustrating the dependence of the AMS ellipsoid shape parameter (T) on the degree of anisotropy (P); dependence of P on the bulk magnetic susceptibility (Km). * – the data for layer 12 are in good agreement with the AMS measurements in the samples from the Nefedovian horizon without reference to thickness and were interpreted together with those.

палеопотоков, выявленными по текстурным особенностям пород и интерпретируемыми как в целом западные [Surkov et al., 2007].

5. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Актуальные представления об особенностях формирования и развития южной части позднепалеозойского Уральского орогена освещены в обзоре [Ivanov, Puchkov, 2022; и ссылки в данной работе], а исследования на основе анализа изотопных возрастов циркона приведены, например, в работах [Kuznetsov, Romanyuk, 2021; Kholodnov et al., 2021]. Позднепермский – раннетриасовый временной интервал охарактеризован в этом отношении на основе изучения терригенных комплексов, обнажающихся в пределах Бельской впадины к северу от пос. Саракташ [Badida, Mizens, 2015; Mizens et al., 2015; Maslov et al., 2016], а также первых результатов U-Pb датирования циркона из верхнепермских песчаников разреза Боевая Гора [Chistyakova et al., 2022].

Комплексный анализ состава прозрачной части минералов тяжелой фракции разреза Боевая Гора, вклю-

чая химический состав минералов группы граната, U-Pb возраст и внутреннее строение циркона, позволяет рассматривать в качестве источников обломочного материала следующие петрокомплексы (рис. 8).

Породы, содержащие циркон с девонскими оценками изотопного возраста, широко представлены в пределах зоны Главного Уральского разлома [Fershtater, 2015, и ссылки в данной работе], а также распространены в структуре Магнитогорской зоны [Fershtater, 2013; Kholodnov et al., 2021]. В меньшей степени в формирование обломочного материала разреза Боевая Гора, вероятно, вносили вклад разнообразные более молодые раннекаменноугольные магматические комплексы Магнитогорской зоны [Fershtater, 2013; Salikhov et al., 2016, 2019; Kholodnov et al., 2021].

Идентифицированные в значительном количестве гранаты гроссуляр-андрадитового ряда в пермско-триасовых песчаниках разреза Боевая Гора, вероятнее всего, указывают на широкое распространение контактово-метасоматических пород в области питающих провинций, что полностью согласуется с интерпретацией на основании U-Pb возрастов циркона. Также

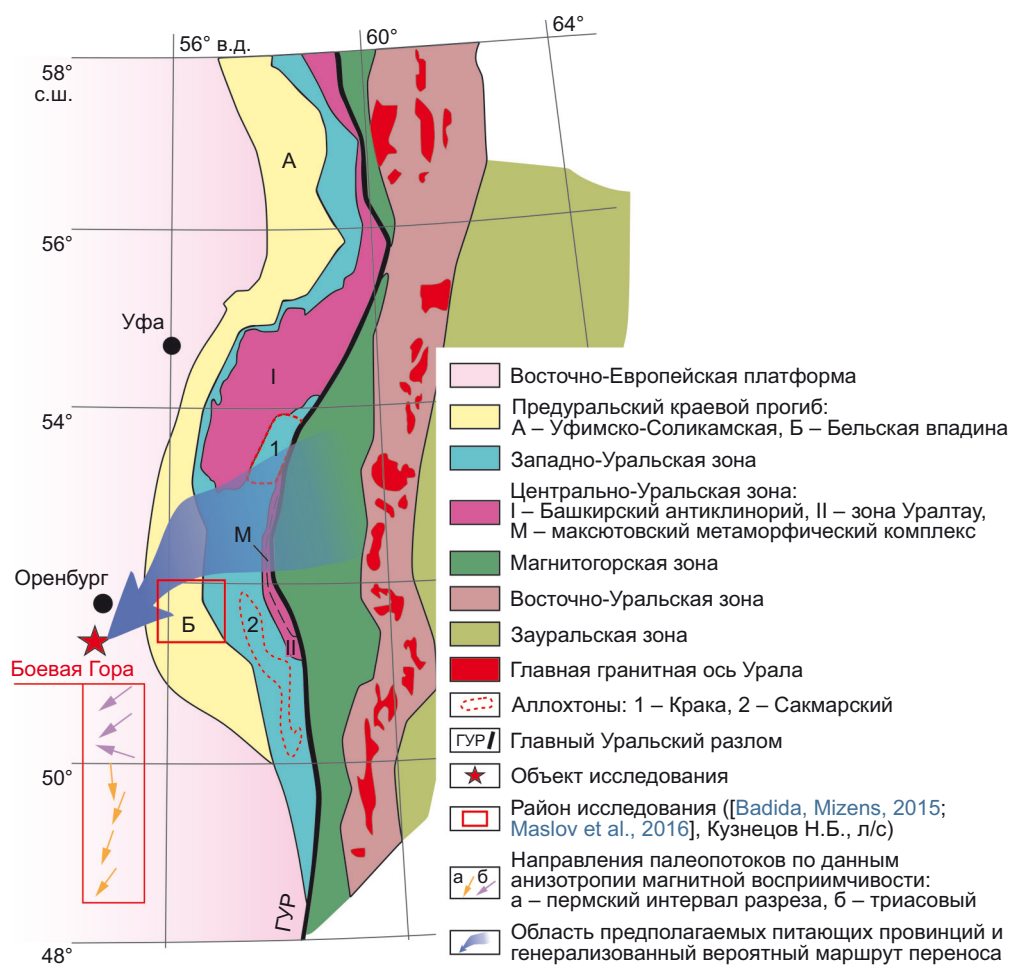


Рис. 8. Схема тектонического районирования Южного Урала по [Ivanov, Puchkov, 2022] и предполагаемая конфигурация сноса обломочного материала в пограничное пермско-триасовое время.

Fig. 8. Scheme of tectonic zoning of the Southern Urals according to [Ivanov, Puchkov, 2022] and the assumed configuration of clastic sediment transport at the Permian-Triassic boundary.

вероятен сценарий, при котором в область размыва были активно вовлечены контактово-метасоматические комплексы, пространственно ассоциирующие с магматическими массивами каменноугольного возраста, при этом последние ещё не были выведены на уровень эрозионного среза.

Скарны широко развиты и в ассоциации с гранитоидами Главной гранитной оси Урала в пределах Восточно-Уральской мегазоны. Однако наиболее характерные для этих гранитоидов оценки изотопного возраста, в том числе и раннекаменноугольные, нетипичны для распределений U-Pb возрастов обломочного циркона в изученных пробах верхней перми и нижнего триаса Южного Предуралья. В то же время привлекает внимание тот факт, что «уральская» популяция циркона в пермско-триасовых песчаниках Московской синеклизы, наоборот, представлена зернами с оценками изотопного возраста в интервале 340–360 млн лет, которые могут составлять до 50 % всей выборки [Chistyakova et al., 2023].

Циркон кембрийского и вендского возраста в значительном количестве содержится в самых разнообразных комплексах Южного Урала. Для локализации источников циркона данного возрастного интервала мы учитывали информацию о направлении сноса по текстурным особенностям и данным анизотропии магнитной восприимчивости, химический состав обломочного граната, характер распределения возрастов циркона в целом (наличие/отсутствие раннепротерозойской и других популяций).

Циркон с венд-кембрийскими изотопными оценками возраста, формирующими доминирующий пик около 530–540 млн лет на кривой плотности вероятности, а также зерна рифейского возраста, образующие второстепенные пики ~660, ~730, ~1500 и ~1570 млн лет, характерны для суванякского и максютовского комплексов зоны Уралтау [Golionko et al., 2021, 2023]. Присутствие в пробах гранатов пиральспитового ряда, составы которых характерны для граната глаукофановых сланцев и/или амфиболитов, позволяет дополнительно обосновать один из вероятных комплексов питающих провинций зоны Уралтау – максютовский метаморфический комплекс.

Доминирование раннекембрийской популяции циркона отмечено в ордовикских песчаниках рымкинской и маячной свит на западе Восточно-Уральской мегазоны [Ryazantsev et al., 2019]. Вместе с тем зерна раннекаменноугольного возраста, характеризующего расположенный там же неплюевский комплекс [Tevelev et al., 2021], для песчаников разреза Боевая Гора нетипичны.

Распределения возрастов обломочного циркона из ордовикских песчаников Западно-Уральской мегазоны, Таганайско-Белорецкой зоны, а также аллохтона Крака [Ryazantsev et al., 2019] показали существенную роль популяции циркона с возрастом около 2 млрд лет, представленную в пермско-триасовых песчаниках разреза Боевая Гора только в виде единичных зе-

рен. Провенанс-сигнал метаморфитов Тараташского блока и Александровской зоны [Tevelev et al., 2017] в песчаниках разреза Боевая Гора также не прослеживается, равно как и отсутствуют выраженные популяции обломочного циркона с оценками изотопного возраста, типичными для иных комплексов Башкирского антиклинория [Kuznetsov et al., 2012; Shardakova, 2016; Kuznetsov, Romanyuk, 2021]. Вместе с тем, согласно упомянутому сообщению Н.Б. Кузнецова (ГИН РАН), по результатам U-Pb LA-ICP-MS датирования обломочный циркон из песчаников вязовской свиты Бельской впадины коренным образом отличается присутствием в пробе мезо- и палеопротерозойской популяций (свыше 50 % всей выборки), а также значимой ролью циркона с оценками изотопного возраста около 340 млн лет.

Необходимо также отметить, что в результате исследований химического состава гранатов из пермско-триасовых граувакк Бельской впадины [Badida, Mizens, 2015], опробованных приблизительно в 130 км восточнее разреза Боевая Гора, гроссуляр-андрадитовая «скарновая» ассоциация не была выявлена. В связи с этим, несмотря на хорошую корреляцию возрастных спектров циркона [Maslov et al., 2016], питающие провинции для этих двух районов, по меньшей мере, частично различались.

Накопление изученного 17-метрового интервала пермско-триасовых пород разреза Боевая Гора происходило, на основании средних скоростей накопления подобных отложений, порядка миллиона лет. С учетом полученных данных о направлениях палеопотоков по анизотропии магнитной восприимчивости это позволяет говорить о постоянстве направления поступления обломочного материала в осадочный бассейн разреза Боевая Гора и, вероятно, постоянстве источников сноса, что согласуется с результатами исследований минералов тяжелой фракции. Важно отметить, что изменение степени группирования (кучности) осей эллипсоида магнитной восприимчивости (см. рис. 7) по мощности разреза может рассматриваться как указание на изменение гидродинамического режима осадконакопления: на смену относительно спокойного режима в поздней перми (относительно низкая кучность) приходит более интенсивный в триасовое время (относительно высокая кучность), что, вероятно, связано с активизацией воздымания Палеоуральского горного сооружения на этом рубеже. При этом данные анизотропии магнитной восприимчивости фиксируют описанные изменения не строго на рубеже перми и триаса (т.е. на границе слоев 7 и 8), а несколько раньше. Активизация речной системы Урала в конце перми в «вязниковское» время (жуковский горизонт) отмечается и для центральных районов Восточно-Европейской платформы (например [Arefiev et al., 2016a, 2016b]).

В Южном Предуралье граница перми и триаса ассоциируется с нижней границей вохминского горизонта, которая совпадает с границей кульчумовской и копанской свит. В разрезе Боевая Гора данная граница

обычно позиционируется в основании песчаников слоя 9 [Surkov et al., 2007; Taylor et al., 2009]. Этому не противоречат биостратиграфические данные [Sennikov et al., 2022]: в конгломератах и гравелитах из самой нижней части слоя 7 обнаружены остатки амфибий *Tupilakosaurus*, что свидетельствует о вохминском возрасте отложений, а слои 10 и 12 охарактеризованы довохминскими, верхневятскими остракодами. Однако проведенные нами исследования свидетельствуют о том, что слои 8 и 9 более схожи с нижележащей кульчумовской свитой, чем с вышележащими породами копанской свиты. Действительно, по составу тяжелой фракции (табл. 2), меньшей степени окатанности зерен минералов тяжелой фракции, наличию обломочного циркона архейского возраста (см. рис. 4) песчаник слоя 9 (проба BG-1) несравненно более схож с песчаником кульчумовской свиты (проба BG-3), чем с песчаником копанской свиты (проба BG-2). По данным АМВ отложения слоев 8 и 9 формировались потоками субмеридионального направления течения, как и нижележащие слои 10, 12 и 13 кульчумовской свиты, в отличие от вышележащих отложений копанской свиты (слои 6 и 7), которые формировались потоками субширотного направления (см. рис. 2). Таким образом, по результатам нашего исследования граница кульчумовской и копанской свит, а следовательно, и нижние границы вохминского горизонта и триасовой системы в разрезе Боевая Гора располагаются в основании слоя 7. Породы нижележащих слоев 8–10 намагничены в эпоху прямой полярности [Fetisova et al., 2023a] и, по всей видимости, соответствуют зоне прямой полярности N_3P-T и, следовательно, жуковскому горизонту [Fetisova et al., 2022, 2023b].

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При формировании пограничных пермско-триасовых пород зоны сочленения Южного Урала и Восточно-Европейской платформы в эрозионный размыв были вовлечены магматические, метаморфические и терригенные комплексы, содержащие главным образом циркон венд-кембрийского и ранне- и среднедевонского возраста и, в меньшей степени, мезопротерозойский циркон с возрастом около 1500 млн лет.

Для изученного пермско-триасового интервала разреза Боевая Гора накопление терригенного материала происходило в условиях стабильных питающих провинций, расположенных в пределах тектонических зон Уралтау, Главного Уральского разлома (Присакмаро-Вознесенской) и Магнитогорской. Направление потоков носило преимущественно субмеридиональный характер, при этом поступление обломочного материала за счет размыва комплексов Башкирского мегаантиклинория не прослеживается.

Состав комплексов потенциальных питающих провинций подтверждает более восточное, относительно современного, положение главного водораздела Палеоуральского орогена на рубеже перми и триаса [Mizens et al., 2015], которое реконструируется в границах Маг-

нитогорской мегазоны. Послойный анализ анизотропии магнитной восприимчивости согласуется с представлениями об усилении гидродинамического режима в поздневятское время.

Известные на настоящий момент результаты изучения минералов тяжелой фракции из пермско-триасовых разрезов Бельской впадины и Южного Предуралья позволяют предположить наличие сложно разветвленной системы стока поверхностных текучих вод на Восточно-Европейскую платформу со стороны Палеоуральского орогена в то время.

В перспективе систематические исследования, направленные на накопление данных о составе и возрасте минералов тяжелой фракции, позволят значительно детализировать представления о палеогеографической обстановке в пределах юго-востока Русской плиты в поздней перми – раннем триасе.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы искренне признательны К.Г. Ерофеевой, А.В. Тевелеву и А.В. Латышеву за ценные рекомендации по обработке и интерпретации полученных данных.

8. 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.

9. 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.

10. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Andersen T., 2002. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses That Do Not Report ^{204}Pb . *Chemical Geology* 192 (1–2), 59–79. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00195-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00195-X).

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 Section* 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. 47–62].

Arefiev M.P., Golubev V.K., Kuleshov V.N., Kukhtinov D.A., Minikh A.V., Pokrovsky B.G., Silantiev V.V., Urazaeva M.N. et al., 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 Section 91 (1), 24–49 (in Russian) [Арефьев М.П., Голубев В.К., Кулешов В.Н., Кухтин Д.А., Миних А.В., Покровский Б.Г., Силантьев В.В., Уразаева М.Н. и др. 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].

Badida L.V., Mizens G.A., 2015. Crystal-Chemical Characteristics of Accessory Minerals of Molasse Sandstones of the Southern Cis-Ural Trough. In: I.I. Chajkovskij (Ed.), The Problems of Mineralogy, Petrography and Metallogeny. Scientific Readings in the Memory of P.N. Chirvinsky. Vol. 18. Publishing House of Perm State University, Perm, p. 77–84 (in Russian) [Бадида Л.В., Мизенс Г.А. Кристаллохимическая характеристика акцессорных минералов молассовых песчаников юга Предуралья // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского / Ред. И.И. Чайковский. Пермь: Изд-во ПГНИУ, 2015. Вып. 18. С. 77–84].

Berger M.G., 1986. Terrigenous Mineralogy. Nedra, Moscow, 227 p. (in Russian) [Бергер М.Г. Терригенная минералогия. М.: Недра, 1986. 227 с.].

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 (2), 0600 (in Russian) [Чистякова А.В., Иванов А.В., Брянский Н.В., Веселовский Р.В., Голованова Т.И., Голубев В.К. Первые результаты U-Pb LA-ICP-MS датирования обломочного циркона из верхнепермских песчаников разреза Боевая Гора (Оренбургская область, Южное Предуралье) // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13. № 2. 0600]. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2s-0600>.

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 (in Russian) [Чистякова А.В., Веселовский Р.В., Хубанов В.Б., Иванов А.В., Марфин А.Е., Брянский Н.В., Голубев В.К. Реконструкция питающих провинций Московского бассейна в пермско-триасовое время по данным U-Pb LA-ICP-MS датирования и рамановской спектроскопии обломочного циркона // Геодинамика и тектонофизика. 2023. Т. 14. № 5. 0718]. <https://doi.org/10.5800/GT-2023-14-5-0718>.

Dickinson W.R., Gehrels G.E., 2009. Use of U-Pb Ages of Detrital Zircons to Infer Maximum Depositional Ages of Strata: A Test Against a Colorado Plateau Mesozoic Database. Earth and Planetary Science Letters 288 (1–2), 115–125. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.09.013>.

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) [Ферштатер Г.Б. Палеозойский интрузивный магматизм Среднего и Южного Урала. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2013. 368 с.].

Fershtater G.B., 2015. Early Devonian Intrusive Magmatism of the Urals as Indicator Critical Stage Paleozoic History Mobile Belt. Lithosphere 5, 5–29 (in Russian) [Ферштатер Г.Б. Раннедевонский интрузивный магматизм Урала – индикатор переломного этапа в палеозойской истории подвижного пояса // Литосфера. 2015. № 5. С. 5–29].

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>.

Fetisova A.M., Veselovskiy R.V., Golubev V.K., 2023a. Paleomagnetism of the Permian-Triassic Boundary of the Orenburg Region (East European Platform, Volga-Ural Antecline). Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki 165 (4), 590–605 (in Russian) [Фетисова А.М., Веселовский Р.В., Голубев В.К. Палеомagnetизм границы перми-триаса Оренбургской области (Восточно-Европейская платформа, Волго-Уральская антеклиза) // Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. 2023. Т. 165. № 4. С. 590–605]. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.4.590-605>.

Fetisova A.M., Veselovsky R.V., Sirotin K.A., Golubev V.K., Rudko D.V., 2023b. Paleomagnetism and Cyclostratigraphy of the Permian-Triassic Boundary Interval of the Staroe Slukino Section, Vladimir Region. Izvestiya, Physics of the Solid Earth 59, 254–266. <https://doi.org/10.1134/S1069351323020064>.

Golionko B.G., Kuznetsov N.B., Strashko A.V., Romanyuk T.V., Novikova A.S., Dubensky A.S., Sheshukov V.S., Erofeeva K.G., 2023. On Paleotectonic Belonging of the Suvanyak Metamorphic Complex (Southern Urals) from the U-Th-Pb Dating of Detrital Zircon Grains. Geodynamics & Tectonophysics 14 (2), 0693 (in Russian) [Голионко Б.Г., Кузнецов Н.Б., Страшко А.В., Романюк Т.В., Новикова А.С., Дубенский А.С., Шешуков В.С., Ерофеева К.Г. К вопросу о палеотектонической принадлежности протолита суваянского метаморфического комплекса (Южный Урал) по результатам U-Th-Pb датирования зерен обломочного циркона // Геодинамика и тектонофизика. 2023. Т. 14. № 2. 0693]. <https://doi.org/10.5800/GT-2023-14-2-0693>.

Golionko B.G., Ryazantsev A.V., Kanygina N.A., 2021. Structure and Geodynamic Evolution of the Maksyutov Metamorphic Complex (Southern Urals): Structural Analysis

and Results of U-Pb Dating of Detrital Zircons. *Geotectonics* 55, 795–821. <https://doi.org/10.1134/S0016852121060030>.

Griffin W.L., Powell W.J., Pearson N.J., O'Reilly S.Y., 2008. GLITTER: Data Reduction Software for Laser Ablation ICPMS. 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, Canada, p. 308–311.

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>.

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>.

Ivanov K.S., Puchkov V.N., 2022. Structural-Formational Zoning of the Ural Fold Belt: An Overview and New Approach. *Geotectonics* 56, 747–780. <https://doi.org/10.1134/S0016852122060036>.

Kholodnov V.V., Shardaikova G.Yu., Puchkov V.N., Petrov G.A., Shagalov E.S., Salikhov D.N., Korovko A.V., Pribavkin S.V., Rakhimov I.R., Borodina N.S., 2021. Paleozoic Granitoid Magmatism of the Urals: The Reflection of the Stages of Geodynamic and Geochemical Evolution of a Collisional Orogen. *Geodynamics & Tectonophysics* 12 (2), 225–245 (in Russian) [Холоднов В.В., Шардаикова Г.Ю., Пучков В.Н., Петров Г.А., Шагалов Е.С., Салихов Д.Н., Коровко А.В., Прибавкин С.В., Рахимов И.Р., Бородин Н.С. Палеозойский гранитоидный магматизм Урала как отражение этапов геодинамической и геохимической эволюции коллизионного орогена // Геодинамика и тектонофизика. 2021. Т. 12. № 2. С. 225–245]. <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-2-0522>.

Kovach V., Adamskaya E., Kotov A., Podkovyrov V., Tolmacheva E., Gladkochub D., Sklyarov E., Velikoslavinsky S. et al., 2023. Age of Provenance for the Paleoproterozoic Kemen Group, Udokan Complex: "Hidden" Paleoproterozoic Crust-Forming Event in the Western Aldan Shield, Siberian Craton. *Precambrian Research* 396, 107158. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2023.107158>.

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 (6), 489–510. <https://doi.org/10.1134/S0024490219060075>.

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., Romanyuk T.V., Shatsillo A.V., Golovanova I.V., Danukalov K.N., Meert J., 2012. The Age of Detrital Zircons from Asha Group, Southern Ural – Verification of

Idea About the Spatial Conjugation of Baltica and Australia Within the Rodinia Supercontinent (a Positive Test of the "Australia Upside Down Conception"). *Lithosphere* 4, 59–77 (in Russian) [Кузнецов Н.Б., Романюк Т.В., Шацилло А.В., Голованова И.В., Данукалов К.Н., Меерт Дж. Возраст детритных цирконов из ашинской серии Южного Урала – подтверждение пространственной сопряженности Уральского края Балтики и Квинслендского края Австралии в структуре Родинии («Australia Upside Down Conception») // Литосфера. 2012. № 4. С. 59–77].

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>.

Maslov A.V., Mizens G.A., Vovna G.M., Pyzhova E.S., Kuznetsov N.B., Kiselev V.I., Ronkin Yu.L., Bikbaev A.Z., Romanuk 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].

Mizens G.A., Maslov A.V., Badida L.V., Vovna G.M., Kiselev V.I., Ronkin Y.L., Hiller V.V., 2015. Molasse of the Belskii Depression of the Cis-Uralian Foredeep: Modern Data About Provenance. *Doklady Earth Sciences* 465, 1207–1210. <https://doi.org/10.1134/S1028334X15120041>.

Newell A.J., Tverdokhlebov V.P., Benton M.J., 1999. Interplay of Tectonics and Climate on a Transverse Fluvial System, Upper Permian, Southern Uralian Foreland Basin, Russia. *Sedimentary Geology* 127 (1–2), 11–29. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(99\)00009-3](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(99)00009-3).

Park M.E., Cho H., Son M., Sohn Yu.K., 2013. Depositional Processes, Paleoflow Patterns, and Evolution of a Miocene Gravelly Fan-Delta System in SE Korea Constrained by Anisotropy of Magnetic Susceptibility Analysis of Interbedded Mudrocks. *Marine and Petroleum Geology* 48, 206–223. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2013.08.015>.

Ryazantsev A.V., Kuznetsov N.B., Degtyarev K.E., Romanuk T.V., Tolmacheva T.Yu., Belousova E.A., 2019. Vendian–Cambrian Active Continental Margin of the Southern Urals: Results of Studying Detrital Zircons from Ordovician Terrigenous Rocks. *Geotectonics* 53, 485–499. <https://doi.org/10.1134/S0016852119040058>.

Salikhov D.N., Holodnov V.V., Osipova T.A., Rakhimov I.R., 2016. Carboniferous–Permian Magmatism and Associated Mineralization (Magnitogorsk and East Uralian Megazones Southern Urals). *Lithosphere* 5, 35–57 (in Russian) [Салихов Д.Н., Холоднов В.В., Осипова Т.А., Рахимов И.Р. Каменноугольно-пермский магматизм и связанное с ним

оруденение (Магнитогорская и Восточно-Уральская мегазоны Южного Урала) // Литосфера. 2016. № 5. С. 35–57].

Salikhov D.N., Kholodnov V.V., Puchkov V.N., Rakhimov I.R., 2019. The Magnitogorsk Zone of the South Urals in the Late Paleozoic: Magmatism, Fluid Regime, Metallogeny, and Geodynamics. Nauka, Moscow, 392 p. (in Russian) [Салихов Д.Н., Холоднов В.В., Пучков В.Н., Рахимов И.Р. Магнитогорская зона Южного Урала в позднем палеозое: магматизм, флюидный режим, металлогения, геодинамика. М.: Наука, 2019. 392 с.].

Sarkisyan S.G., Pokrovskaya N.D., 1949. Mineralogical Correlates of the Upper Permian and Triassic Deposits of the Chkalovsky Urals. Doklady of the USSR Academy of Sciences LXV (5), 739–740 (in Russian) [Саркисян С.Г., Покровская Н.Д. Минералогические коррелятивы верхнепермских и триасовых отложений Чкаловского Приуралья // Доклады АН СССР. 1949. Т. LXV. № 5. С. 739–740].

Sennikov A.G., Novikov I.V., Golubev V.K., Naumcheva M.A., Ulyakhin A.V., Zenina Yu.V., Gunchin R.A., 2022. On the Faunistic Characteristics of the Reference Section of the Permian-Triassic Boundary Deposits Boevaya Gora in the Southern Urals. In: Paleontology and Stratigraphy: Current State and Development Paths. Proceedings of the LXVIII Session of the Paleontological Society of the Russian Academy of Sciences, Dedicated to the 100th Anniversary of the Birth of A.I. Zhamoide. VSEGEI, Saint Petersburg, p. 237–240 (in Russian) [Сенников А.Г., Новиков И.В., Голубев В.К., Наумчева М.А., Ульяхин А.В., Зенина Ю.В., Гунчин Р.А. К фаунистической характеристике опорного разреза пограничных отложений перми и триаса Боевая Гора в Южном Приуралье // Палеонтология и стратиграфия: современное состояние и пути развития: Материалы LXVIII сессии Палеонтологического общества при РАН, посвященной 100-летию со дня рождения А.И. Жамойды. СПб.: ВСЕГЕИ, 2022. С. 237–240].

Shardakova G.Yu., 2016. Geochemistry and Isotopic Ages of Granitoids of the Bashkirian Mega-Anticlinorium: Evidence for Several Pulses of Tectono-Magmatic Activity at the Junction Zone Between the Uralian Orogen and East European Platform. Geochemistry International 54, 594–608. <https://doi.org/10.1134/S0016702916070089>.

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>.

State Geological Map of the Russian Federation, 2013. Series Ural. Scale of 1:1000000. Sheet M-40 (Orenburg). VSEGEI, Saint Petersburg (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия Уральская. Масштаб 1:1000000. Лист М-40 (Оренбург). СПб.: ВСЕГЕИ, 2013].

Suggate S.M., Hall R., 2014. Using Detrital Garnet Compositions to Determine Provenance: A New Compositional Database and Procedure. Geological Society of London Special Publications 386 (1), 373–393. <https://doi.org/10.1144/SP386.8>.

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].

Surkov M.V., Benton M.J., Twitchett R.J., Tverdokhlebov V.P., Newell A.J., 2007. First Occurrence of Footprints of Large Therapsids from the Upper Permian of European Russia. Palaeontology 50 (3), 641–652. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4983.2007.00647.x>.

Taylor G.K., Tucker C., Twitchett R.J., Kearsey 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>.

Tevelev A.V., Sobolev I.D., Borisenko A.A., Pravikova N.V., Kazansky A.J., Koptev E.V., Kosheleva I.A., Žák J., 2021. The Initial Stage of Early Carboniferous Rifting in the Southern Urals: First Results of Zircon U-Pb Dating from Granitoids of Neplyuevka Complex. Moscow University Bulletin. Series 4. Geology 6, 40–48 (in Russian) [Тевелев А.В., Соболев И.Д., Борисенко А.А., Правикова Н.В., Казанский А.Ю., Коптев Е.В., Кошелева И.А., Жак Ю. Начальный этап раннекаменноугольного рифтинга на Южном Урале: первые результаты U-Pb датирования циркона из гранитоидов неплюевского комплекса // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2021. № 6. С. 40–48]. <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2021-6-40-48>.

Tevelev A.V., Mosejchuk V.M., Tevelev Ark.V., Shkursky B.B., 2017. Distribution of Zircon Age Values in Metamorphic Rocks Within the Taratash Block of the Southern Urals (Initial Provenance Signal). Moscow University Bulletin. Series 4. Geology 4, 15–19 (in Russian) [Тевелев А.В., Мосейчук В.М., Тевелев Арк.В., Шкурский Б.Б. Распределение значений возраста цирконов в метаморфитах Тараташского блока Южного Урала (исходный провенанс-сигнал) // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2017. № 4. С. 15–19]. <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2017-4-15-19>.

Tverdokhlebov V.P., Surkov M.V., Tverdokhlebova G.I., 2007. Continental Paleo-Ecosystems of the Paleozoic-Mesozoic Boundary. Article 3. Late Vyatsky-Vyaznikovsky and Early Kopansky Period, the South-East of East European Platform. Proceedings of Higher Educational Establishments. Geology and Exploration 1, 1–8 (in Russian) [Твердохлебов В.П., Сурков М.В., Твердохлебова Г.И. Континентальные палеоэкосистемы рубежа палеозоя и мезозоя. Статья 3. Поздневятское-вязниковское и раннекопанское время,

юго-восток Восточно-Европейской платформы // Известия вузов. Геология и разведка. 2007. № 1. С. 1–8].

Tverdokhlebov V.P., Tverdokhlebova G.I., Minikh A.V., Surkov M.V., Benton M.J., 2005. Upper Permian Vertebrates and Their Sedimentological Context in the South Urals, Russia. *Earth-Science Reviews* 69 (1–2), 27–77. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.07.003>.

Tverdokhlebov V.P., Tverdokhlebova G.I., Surkov M.V., Benton M.J., 2002. Tetrapod Localities from the Triassic of the SE of European Russia. *Earth-Science Reviews* 60 (1–2), 1–66. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(02\)00076-4](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(02)00076-4).

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., Afionogenova 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>.