

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2025.3.21>

УДК 550.93:551.72(470.4./5)

Первые результаты U-Pb (LA-ICP-MS) датирования детритовых цирконов из песчаников старопетровской свиты венда Волго-Уральского осадочного бассейна и потенциальные источники цирконовой кластики

С.А. Дьякова^{1*}, Н.Д. Сергеева¹, А.В. Куликова², М.Р. Лукманова^{1,3}, Т.Р. Абдеев^{1,3}, П.А. Красильников²

¹Институт геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН, Уфа, Россия

²Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

³Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Впервые получена информация о возрасте пород – источников цирконовой кластики для отложений старопетровской свиты венда Волго-Уральского осадочного бассейна. В результате U-Pb (LA-ICP-MS) датирования детритовых цирконов из песчаников старопетровской свиты в скважине Красноусольская, расположенной в Предуральском краевом прогибе, получен широкий временной диапазон возрастов цирконовой кластики: от архея – 3247 млн лет до венда – 577 млн лет. Особенности распределения возрастных популяций цирконов из песчаников старопетровской свиты свидетельствовали о поступлении обломочного материала в Волго-Уральский бассейн преимущественно из местных питающих провинций. Источником наиболее древней (2944–2660 млн лет и 2507–1831 млн лет) популяции цирконов для песчаников старопетровской свиты предполагаются архей-палеопротерозойские образования Тараташского метаморфического комплекса Южного Урала и кристаллические породы фундамента платформы Волго-Уральской области. Для детритовых цирконов с возрастными 1720–1472 млн лет, 1390–1044 и 736–653 млн лет, отвечающим раннему, среднему и завершающему рифею, в качестве потенциальных источников цирконовой кластики рассматриваются имеющие современные изотопные датировки по циркону и бадделейту интрузивные и вулканогенные образования навышского, машакского и игонинского магматических комплексов рифея Южного Урала и базальты актаньшского (скв. 203 Мензелино-Актаньшская) и кипчакского (скв. 1 Кипчакская) вулканогенных комплексов Волго-Уральской области. В местных питающих провинциях не установлены источники цирконов с возрастными 964–851 млн лет и 643–603 млн лет, что, вероятнее всего, связано с недостаточной изотопно-геохронологической изученностью осадочных и магматических комплексов докембрия Восточно-Европейской платформы и её складчатого обрамления. Среди докембрийских образований особое место занимают вендские отложения, к которым в Волго-Уральской области приурочены многочисленные проявления нефти и газа, что делает отложения венда привлекательным объектом на поиски углеводородов.

Ключевые слова: детритовый циркон, датирование, LA-ICP-MS, старопетровская свита, венд, Волго-Уральская область

Для цитирования: Дьякова С.А., Сергеева Н.Д., Куликова А.В., Лукманова М.Р., Абдеев Т.Р., Красильников П.А. (2025). Первые результаты U-Pb (LA-ICP-MS) датирования детритовых цирконов из песчаников старопетровской свиты венда Волго-Уральского осадочного бассейна и потенциальные источники цирконовой кластики. *Георесурсы*, 27(3), с. 195–208. <https://doi.org/10.18599/grs.2025.3.21>

Введение

Волго-Уральский осадочный бассейн расположен на восточной окраине Восточно-Европейской платформы (ВЕП). С запада бассейн ограничен выступами кристаллического фундамента, с востока – складчатыми структурами Урала.

Осадочные отложения Волго-Уральского бассейна вскрыты скважинами на различных глубинах (от 1,2 км до 3,7 км), где представлены неметаморфизованными толщами рифея, венда и фанерозоя, перекрывающими архей-раннепротерозойские метаморфические и магматические образования кристаллического фундамента.

* Ответственный автор: Светлана Андреевна Дьякова
e-mail: solodova.IG@yandex.ru

© 2025 Коллектив авторов

Статья находится в открытом доступе и распространяется в соответствии с лицензией Creative Commons Attribution (CC BY) License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Рифейский комплекс платформенных отложений образован в авлакогенных структурах в процессе рифтогенеза. Развитие вендских надрифтовых бассейнов связано с коллизионными процессами и формированием складчатой системы тиманид в области современного Урала (Пучков, 2010). Поздневендская орогения привела к существенному изменению структурно – тектонического облика юго-восточной окраины платформы и характера источников сноса обломочного материала (Пучков, Козлов, 2005).

Мощные комплексы терригенных пород венда на Южном Урале (ашинская серия Башкирского мегантиклинория) и на востоке ВЕП (каировская и шкаповская серии Шкапово-Шиханской впадины) имели длительную историю изучения, но их молассовая природа была обоснована Ю.Р. Беккером (1968, 1988 и ссылки там же). Позднее (Пучков, 2000, 2010; Сергеева и др., 2019) к типично молассовым образованиям были отнесены отложения только верхнего венда: басинская, куккараукская и зиганская свиты уральского разреза и их возрастные аналоги старопетровская, салиховская и карлинская свиты платформы.

Обоснование возраста платформенных образований венда до настоящего времени основывается на единственной датировке (579 млн лет, возраст по константам 1976 г.) по глаукониту из отложений старопетровской свиты (интервал глубин 1852,7–1858 м) в скважине 23 Мензелино-Актанышская (Казаков и др., 1967; Стратотип рифея..., 1983) и наличию вендского комплекса микрофоссилий (Лагутенкова и др., 1982; Янкаускас, 1982; Козлова, 1990).

Эта ситуация создает сложности при геологической интерпретации разобренных разрезов скважин в регионе,

их корреляции с опорными разрезами венда западного склона Южного Урала и выявлении источников обломочного материала в осадочный бассейн венда.

В последние годы при определении потенциальных источников кластики для терригенных толщ различных стратиграфических уровней используется U-Pb (LA-ICP-MS) изотопное датирование детритового циркона из псаммитовых пород. Некоторая информационная база геохронологических данных имеется к настоящему времени для отложений ашинской серии венда Южного Урала (Кузнецов и др., 2012; Разумовский и др., 2020; Рязанцев и др., 2023).

Целью работы является получение информации о возрасте детритового циркона из песчаников старопетровской свиты венда Волго-Уральского осадочного бассейна для суждений о возможных источниках цирконовой кластики в питающих провинциях. Для достижения цели авторами были поставлены задачи по выделению представительной монофракции циркона из песчаников старопетровской свиты и его последующее U-Pb датирование методом LA-ICP-MS, определение источников сноса на основе возрастных характеристик цирконовой кластики.

Литолого-стратиграфическая характеристика

В Волго-Уральском бассейне вендские отложения развиты в двух крупных краевых впадинах – Верхнекамской и Шкапово-Шиханской, разделенных Сарапульско-Яныбаевской седловиной (рис. 1).

Наиболее полно вендские отложения (V) представлены в разрезах глубоких скважин Шкапово-Шиханской



Рис. 1. Фрагмент карты структур и распространения вендских отложений на юго-восточной окраине ВЕП и западном склоне Южного Урала. Составлена по (Аксенов, 1998; Башкова, Карасева, 2023; Стратиграфическая схема..., 2000) с дополнениями авторов. На врезке: положение участка исследований. Обозначения: Основные структурно-тектонические подразделения: I – Татарский свод; II – Предуральский краевой прогиб; III – складчатый Урал. 1–3 – отложения: 1 – архея – раннего протерозоя, 2 – рифея, 3 – венда; 4 – палеозоя, 5 – западная граница распространения вендских отложений; 6 – границы структур; 7 – тектонические разломы; 8 – местоположение скважин; 9 – населенные пункты. Названия разведочных площадей: ВА – Восточно-Аскинская, МА – Мензелино-Актанышская, Кпч – Кипчакская, КУ – Красноусольская.

впадины, где находятся все региональные стратотипы стратиграфических подразделений венда Волго-Уральской области (ВУО).

В Шкапово-Шиханской впадине выделены отложения нижнего (сергеевская свита каировской серии) и верхнего (байкибашевская и старопетровская свиты каировской серии, салиховская и карлинская свиты шкаповской серии) венда (табл. 1). Свиты связаны постепенными переходами; региональные несогласия наблюдаются в основании каировской серии, трансгрессивно перекрывающей различные образования рифея и кристаллического фундамента, и в кровле шкаповской, которая с глубоким размывом перекрыта отложениями палеозоя.

Сергеевская свита (V_1sv) представлена аргиллитами, алевролитами и песчаниками преимущественно полевошпат-кварцевого состава, мощностью от 70 м до 545 м.

Байкибашевская свита (V_2bc) сложена песчаниками полимиктовыми, полевошпат-кварцевыми, аркозовыми, субаркозовыми, разнотекстурными, содержащими примесь гравийно-галечникового материала и прослои алевролитов и аргиллитов. Значительные колебания мощности свиты (от 8–25 м до 85–190 м) и отсутствие ее в некоторых скважинах ВУО объясняются неровностями рельефа эродированной поверхности подстилающих отложений.

Старопетровская свита (V_2sp) представлена неравномерным чередованием преимущественно серых песчаников и алевролитов полимиктового, полевошпат-кварцевого, аркозового и субаркозового состава и аргиллитов, часто темно-серых и черных, углеродсодержащих. Мощность свиты изменяется от 80 до 465 м.

Салиховская свита (V_2sl) сложена разнотекстурными песчаниками и алевролитами полимиктового состава, с редкими прослоями аргиллитов. В крупнотекстурных разностях отмечаются гравий и мелкая галька размером от 3х5–5х5 мм до 9х10х12 мм. Иногда гравелиты или мелкогалечниковые конгломераты обособлены в прослоях толщиной от 1–3 до 5–10 см. Красноцветные песчаники салиховской свиты служат своеобразным маркирующим горизонтом при межрегиональной корреляции верхневендских отложений ВУО. Мощность свиты 90–440 м.

Карлинская свита (V_2kr) представлена аргиллитами, часто углеродистыми, с подчиненными прослоями полимиктовых и полевошпат-кварцевых алевролитов и песчаников (редко). Свита имеет значительные колебания мощности (от 100 до 610 м), что определяется глубиной предпалеозойского размыва.

Карлинская свита завершает разрез верхнего венда Шкапово-Шиханской впадины, суммарная мощность которого здесь изменяется от 150 до 1685 м.

Объект исследования

Красноусольская скважина, расположенная к югу от пос. Красноусольский Гафурийского района Республики Башкортостан в южной части Бельской депрессии Предуральского краевого прогиба (рис. 1), вскрыла достаточно мощный (1432 м) и стратиграфически полный разрез вендских отложений (рис. 2).

В качестве первоочередного объекта исследования были выбраны отложения старопетровской свиты венда,

представляющие собой фрагмент «не складчатой» платформенной молассы (Беккер, 1968).

Старопетровская свита (V_2sp) в изучаемой скважине выделена в интервале глубин 2575–3062 м, где представлена чередованием аргиллитов, полимиктовых песчаников и алевролитов, преимущественно серой окраски (рис. 2).

Аргиллиты темно-вишневые, прослоями зеленовато-серые со слабым голубоватым оттенком, участками пятнисто окрашенные (пятна вишневой и зеленой окраски), неравномерно алевритистые. Аргиллиты пронизаны тонкими трещинками, выполненными карбонатом и пиритом.

Песчаники полимиктовые, серые и темно-серые с буроватым оттенком, средне-, крупнотекстурные, массивные, крепкие. В песчаниках наблюдаются волнистая, косослоистая и линзовидно-слоистая текстуры. Цемент в песчаниках глинистый поровый и кварцевый регенерационный, а в составе обломков отмечаются зерна эффузивных пород и крупные интракласты темно-вишневых аргиллитов.

В интервале глубин 2647–2657 м вскрыты преимущественно *алевролиты* полимиктовые, темно-вишневые, участками тонкослоистые за счет тонких прослоев зеленых аргиллитов и полимиктовых вишневых, зеленовато- и светло-серых песчаников. Мощность свиты 487 м.

Методы исследования

Для выделения циркона и последующего U-Pb датирования его методом LA-ICP-MS была отобрана штучная проба SD-1-24 из полимиктового разнотекстурного песчаника с глубины 2889,5 м (рис. 2) и измельчена до размера обломков <0,25 мм, отмучена в проточной водопроводной воде от глинистых частиц. Далее разделение минералов по удельному весу в тяжелой жидкости (бромформ), магнитная и электромагнитная сепарации проведены по общепринятой методике (Кухаренко, 1961, Ляхович, 1981).

Монофракцию цирконов отбирали визуально под бинокулярным микроскопом ZEISS Stemi 2000-C (Carl Zeiss, Германия). Зерна цирконов помещались на клеупереносную ленту, заливались в шашки эпоксидной смолой Struers (Дания), шлифовали примерно на треть-половину толщины зерна, затем проводили полировку поверхности.

Для определения морфологии и внутреннего строения цирконов использовались катодолюминесцентные изображения (CL) минералов, полученные с помощью микроскопа ZEISS Axio Lab A1 с катодолюминесцентной приставкой CITL MK5-2 (Carl Zeiss, Германия).

U-Pb изотопное датирование зерен циркона выполнено в научно-образовательном центре «Геотермохронологии» Института геологии и нефтегазовых технологий Казанского (Приволжского) федерального университета (г. Казань).

Для проведения U-Pb датирования цирконов использовалась система лазерной абляции на основе эксимерного лазера (длина волны 193 нм) Analyte Excite (Teledyne Cetac Technologies, США), соединенная с квадрупольным масс-спектрометром с ионизацией в индуктивно-связанной плазме iCAP Qc (Thermo Fisher Scientific, Германия). В качестве газов-переносчиков были использованы: в лазерной установке – He и в масс-спектрометре – Ar жидкий.

Волго-Уральская область (Стратиграфические схемы...2000; Козлов 2004, 2008; Козлов, Сергеева, 2010; Сергеева и др., 2021)			Башкирский мегантиклинорий (Стратиграфические схемы..., 1993; Дополнения..., 2000; Козлов и др., 2011; Пучков, Сергеева, 2021)		Региональная стратиграфическая схема				
Серия	Изотопные данные, млн лет	Свита	Свита	Изотопные данные, млн лет	Серия	Возраст рубежей млн лет	Система	Эратема	Эонотема
Шкаповская		Карлинская	Зиганская	← 547,6±3,8 (U-Pb, Zrn) (Levashova et al., 2013)	Ашинская	535*	Венд		
		Салиховская	Куккараукская						
Каировская	579 (K-Ar, Glt) (Казаков и др., 1967)	• Старопетровская	Басинская	← 577±7 (U-Pb, Zrn) (Рязанцев и др., 2023)	Ашинская				
		Байкибашевская	Урюкская						
	734 (Rb-Sr, Cel) (Горожанин, 2009)	Сергеевская	Бакеевская	← 642±9 (Rb-Sr, Glt) (Зайцева и др., 2019)	Аршинская	650		Терминальный (Аршиний)	
		Кипчакская	Шумская						
Абдуллинская	900 (Pb-Pb, известняк) (Козлов и др., 2003)	Игонинская	Игонинская	← 707±2,3; 732±17 (U-Pb, Zrn) (Краснобаев и др., 2012)	Каратауская	750		Верхний (Каратавий)	
		Махмутовская	Махмутовская						
		Байнасская	Укская	← 663±9, 669±16 (Rb-Sr, Glt) (Зайцева и др., 2008)	Юрматинская	1030*		Средний (Юрматиний)	Рифейская
		Укская	Укская						
		Миньярская	Миньярская	← 820±77 (Rb-Sr, доломит) (Kuznetsov et al., 2017)	Бурзянская	1400		Нижний (Бурзяний)	
		Инзерская	Инзерская						
Серафимовская		• Шиханская	Катавская	← 844±24 (Pb-Pb, известняк) (Kuznetsov et al., 2017)					
		Приютовская	Зильмердакская						
		Леонидовская	Зильмердакская						
		Усинская	Авзянская						
Кырпинская	1386 ± 6 (U-Pb, Bdy) (Сергеева, Пучков, 2016)	Ольховская	Зигазино-комаровская						
		Тукаевская	Зигальгинская						
	1414 ± 40 (Re-Os, 1427 ± 43 аргиллит) (Sperling et al., 2014)	Надеждинская	Машакская	← 1380-1386 (U-Pb, Zrn) (Краснобаев и др., 2013а)					
		Кабаковская	Бакальская	← 1385,3±1,4 (U-Pb, Bdy) (Ernst et al., 2006)					
	1391 ± 2 (U-Pb, Zrn) (Puchkov et al., 2013)	Калтасинская	Саткинская	← 1410-1390 (U-Pb, Zrn) (Краснобаев и др., 2011)					
		Минаевская	Айская						
	1542 ± 18 (K-Ar, базальт) → 1686 ± 95 (K-Ar, Pl) 2016 ± 32 (K-Ar, Ab, Ol) (Козлов и др., 1995)	Ротковская	Айская	← 1752 ± 11 (U-Pb, Zrn) (Краснобаев и др., 2013б)					
		Норкинская							
	1383 ± 2 (U-Pb, Zrn) (Puchkov et al., 2013)	Костинская							
		Сигаевская							
		• ?	AR-PR ₁						

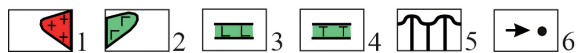


Табл. 1. Сопоставление Стратиграфических схем рифея и венда Южного Урала и Волго-Уральской области. Примечание: 1 – гранитные массивы, 2 – дайки габбро-долеритовые, 3 – базальты, 4 – туфовые прослои, 5 – перерыв в осадконакоплении, 6 – места отбора проб. Сокращения минералов приняты по (Wang, 2021): Ab – альбит, Bdy – бадделейт, Ol – олигоклаз, Pl – плагиоклаз, Zrn – циркон, Glt – глауконит; Cel – селадонит. Изотопно-геохронологические методы определения возрастов: U-Pb – уран-свинцовый, Re-Os – рений-осмиевый, K-Ar – калий-аргоновый, Rb-Sr – рубидий-стронциевый, Pb-Pb – свинец-свинцовый, Sm-Nd – самарий-неодимовый. Возраст рубежей принят по данным (Пучков, Сергеева, 2021), рубежи 535* и 1030* по (Стратиграфический кодекс, 2019).

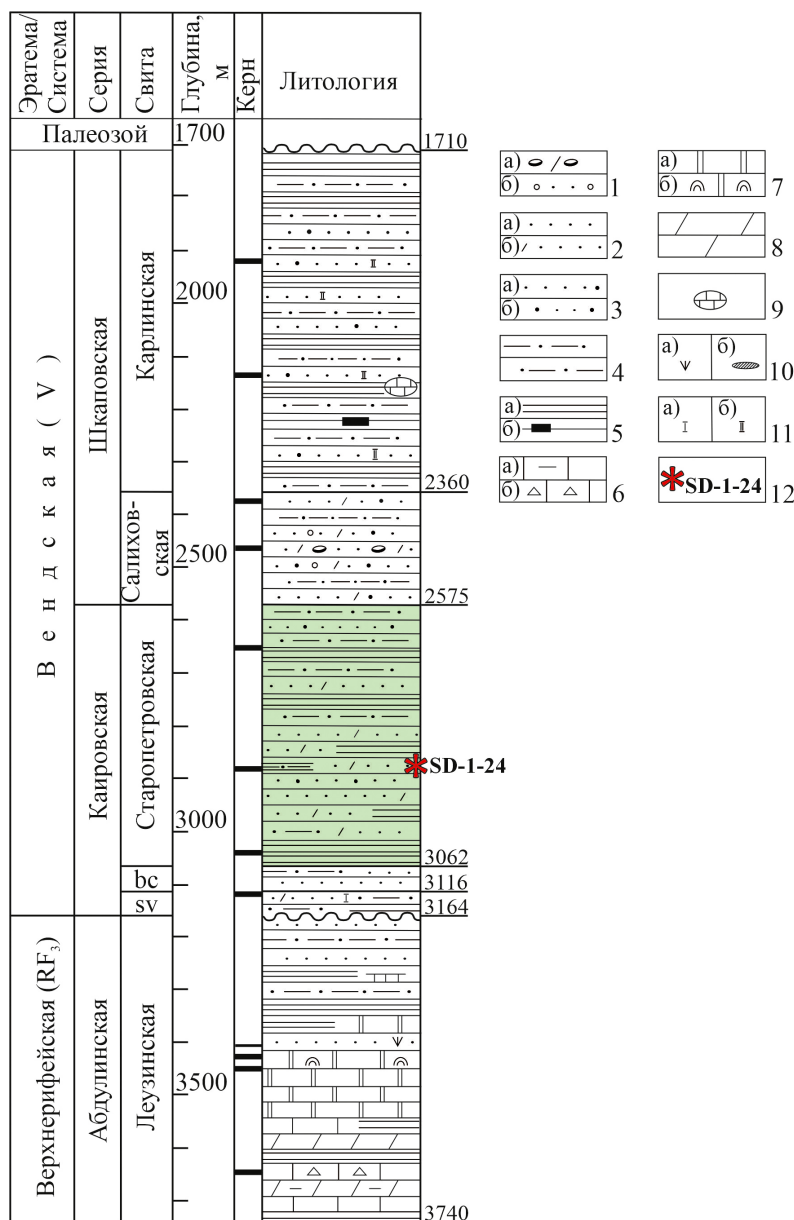


Рис. 2. Разрез верхнекембрийских отложений в Красноульской скважине (Сергеева, Солодова, 2020). Обозначения: 1 – конгломераты (а), гравелиты (б); 2–3 – песчаники: 2 – кварцевые (а), полимиктовые (б), 3 – полевошпат-кварцевые (а), аркозовые (б); 4 – алевролиты; 5 – аргиллиты глинистые (а), углеродистые (б), 6 – известняки глинистые (а), брекчированные (б); 7 – доломиты (а), со строматолитами (б); 8 – мергели; 9 – карбонатная конкреция; 10 – характеристика пород: содержащие глауконит (а), кремни (б), 11 – вторичные изменения: кальцитизация (а), доломитизация (б), 12 – место отбора и номер пробы на циркон.

Все измерения выполняли по массам ^{202}Hg , ^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb , ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U . Измерение ^{235}U изотопа не проводилось, а его содержание рассчитывалось из измеренного значения изотопа ^{238}U , используя естественную распространенность $^{238}\text{U}/^{235}\text{U} = 137,818$ (Hiess et al., 2012).

В качестве стандартов использовались международные эталонные образцы цирконов: 91500 – внешний стандарт, 1063 млн лет (Weidenbeck et al., 1995) и Plešovice – контрольный образец, 337 млн лет (Slama et al., 2008).

Обработка масс-спектрометрических данных, учет коррекций, выбор оптимального участка сигнала, расчет изотопных отношений ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$, $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$, $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$) и соответствующих возрастов проводился с помощью программы Iolite 3.65, встроенной в Igor Pro 7 (Paton et al., 2010).

Расчет средневзвешенных значений возраста по изотопным отношениям, построение гистограммы относительной вероятности выполнялись в Microsoft Excel со встроенным пакетом Isoplot 4.15 (Ludwig, 2003). Для построения гистограммы использовали $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ возрасты для цирконов моложе 1000 млн лет и $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ возрасты для цирконов древнее 1000 млн лет с дискордантностью (D, %) в интервале -10% – 10% . Измерения, где дискордантность $>10\%$, исключались из выборки.

Обсуждение результатов изотопно-геохронологических определений

Исследуемые цирконы из песчаников старопетровской свиты верхнего венда (проба SD-1-24) представлены хорошо окатанными зернами, реже кристаллами со сглаженными ребрами. Окраска цирконов преимущественно

бледно-розовая. По данным катодолюминесценции (CL) и оптической микроскопии цирконы имеют некоторые особенности внутреннего строения (рис. 3): в них присутствуют ядра, минеральные и газово-жидкие включения различной морфологии, часто наблюдаются зерна с отчетливыми зонами роста кристалла (рис. 3, п 94, 58). На поверхности некоторых зерен развиты углубления в виде ветвящихся каналов, которые могут быть интерпретированы как структуры растворения и/или трещины механической абразии (рис. 3, п 94). Размеры зерен колеблются от 0,05х0,05 до 0,125х0,25 мм.

Из пробы SD-1-24 проанализировано 100 зерен циркона (табл. 2) и получено 82 конкордантных значения возрастов. Измерения (18 анализов) с высокой степенью дискордантности исключены из рассмотрения (в таблицах зачеркнуты и выделены серым цветом).

Конкордантные возрастные датировки детритового циркона (n-82) охватывают широкий временной диапазон от 3247 млн лет до 577,8 млн лет (рис. 4) и отвечают определенным хроностратиграфическим уровням Стратиграфической шкалы (Стратиграфический..., 2019; Сергеева и др., 2021): архею нижнему (3247 млн лет, n – 1) и верхнему (2944–2660 млн лет, n – 5), нижнему протерозою (2507–1831 млн лет, n – 23); верхнему протерозою, включая рифей: нижний (1720–1472 млн лет, n – 10), средний (1390–1044 млн лет, n – 19), верхний (964–851 млн лет, n – 3), завершающий (736–653 млн лет, n – 6) и венд (645–577,8 млн лет, n – 15).

Значительная часть датировок dZr (3247 млн лет, n – 1, 2944–2660 млн лет, n – 5, 2507–1831 млн лет, n – 23) имеет архей-палеопротерозойский возраст. Наиболее вероятным источником цирконов данного возраста для осадочных пород старопетровской свиты являются архей-нижнепротерозойские образования Тараташского и Александровского метаморфических комплексов

Южного Урала и выступы пород кристаллического фундамента Восточно-Европейской платформы.

Возраст образований Тараташского и Александровского метаморфических комплексов согласно изотопно-геохронологическим исследованиям составляет – 3500–1800,8 млн лет (Синдерн и др., 2006; Ронкин и др., 2007; Краснобаев и др., 2019; Тевелев и др., 2015). Архейский возраст кристаллических пород фундамента ВУО установлен на уровне 2,79 млрд лет по циркону U-Pb методом (Бибикова и др., 1984) и 2,95–2,65 млрд лет Pb-Pb термоизохронным методом по циркону из фундамента Южно-Татарского свода в разрезе скважины 20000 Минибаевская (Богданова, 1986).

Для раннерифейского временного интервала 1720–1472 млн лет (n – 10) в качестве источника детритового циркона могут рассматриваться базальты навьшского вулканогенного комплекса (1752±11 млн лет), развитые в основании айской свиты нижнего рифея на Южном Урале (Краснобаев и др., 2013б) и базальты (1686±95, 1542±18 млн лет), вскрытые в скважине 203 Мензелино-Актанышская (рис. 1, табл. 1) в норкинской свите нижнего рифея ВУО (Козлов и др., 1995; Puchkov et al., 2013).

Среди изученных зерен циркона из песчаников старопетровской свиты пятая часть имеет среднерифейский (1390–1044 млн лет, n – 19) возраст, что указывает на присутствие в области размыва среднерифейских магматических комплексов, представленных на современной поверхности выравнивания на Южном Урале крупными интрузивными массивами (Бердяушский, Губенский, Рябиновский, Ахмеровский и др. (Puchkov et al., 2021 и ссылки там же)), дайками (Главная бакальская, Кусинская и др. (Ernst et al., 2006; 2008)) и машакским риолит-базальтовым комплексом (Краснобаев и др., 2011; Краснобаев и др., 2008). Формирование перечисленных магматических комплексов ограничено временными рамками 1385–1348 млн лет.

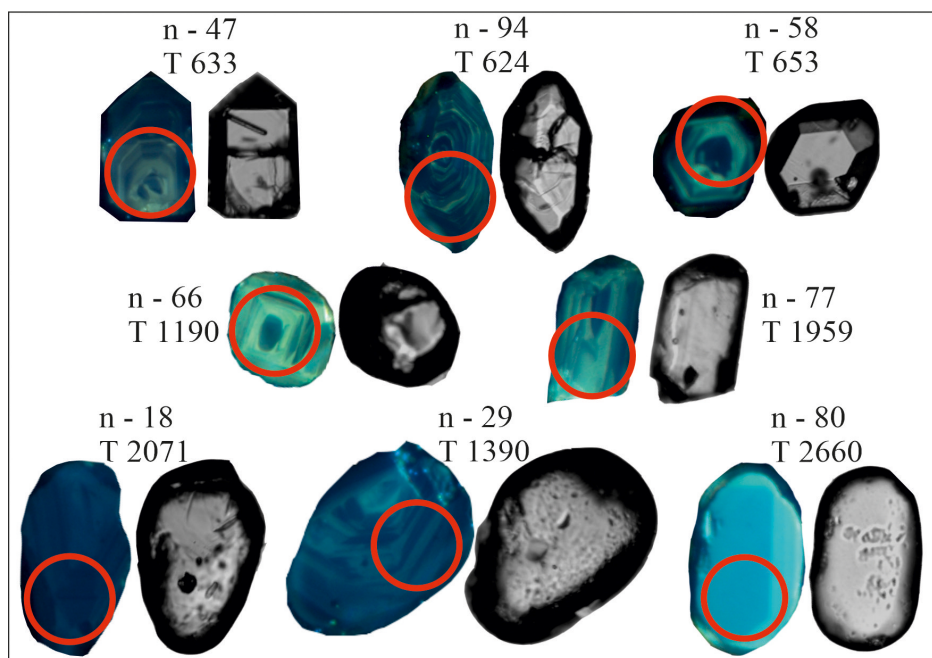


Рис. 3. Катодолюминисцентные (слева) и оптические (справа) изображения цирконов из песчаников старопетровской свиты венда в разрезе Красноуловской скважины. Обозначения: n – номер зерна, в соответствии с таблицей 2, T – возраст. Кружками обозначено положение абляционных кратеров (диаметр кратера 35 мкм).

№ зерна	Изотопные отношения, абсолютные значения						Rho	Возраст, млн лет						D, %	Th/U
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2σ		
1.	0,1242	0,0041	6,6100	0,2800	0,3760	0,0069	0,43	2052	38	2056	32	2000	58	-2,72	0,42
2.	0,0541	0,0064	0,8240	0,0980	0,0998	0,0031	0,26	587	57	613	18	230	240	-4,24	1,27
3.	0,0978	0,0043	4,0500	0,2100	0,2909	0,0071	0,47	1642	44	1645	35	1553	79	-5,59	0,71
4.	0,1202	0,004	5,7800	0,2100	0,3507	0,0072	0,57	1940	29	1936	34	1958	59	1,14	0,44
5.	0,1263	0,003	6,4500	0,1900	0,3722	0,0078	0,71	2034	26	2038	37	2045	44	0,34	0,93
6.	0,0937	0,0054	3,5200	0,2200	0,2643	0,0064	0,39	1512	47	1515	34	1440	110	-4,95	1,16
7.	0,0732	0,0015	1,1060	0,0330	0,1064	0,0017	0,54	756	16	651	10	1001	44	16,13	0,52
8.	0,2179	0,0064	17,7200	0,5800	0,5860	0,014	0,73	2967	31	2968	57	2944	47	-0,81	1,56
9.	0,1238	0,0034	6,1800	0,2100	0,3627	0,0085	0,69	1996	29	1993	40	1999	49	0,30	0,92
10.	0,0950	0,0028	3,5200	0,1100	0,2679	0,0049	0,59	1529	24	1529	25	1504	58	-1,64	0,87
11.	0,0592	0,0032	0,9530	0,0570	0,1108	0,0026	0,39	675	30	677	15	520	120	-0,30	0,49
12.	0,1019	0,0015	4,1770	0,0730	0,2958	0,0044	0,85	1667	14	1673	23	1653	26	-1,20	0,67
13.	0,0900	0,0032	3,2400	0,1200	0,2541	0,0048	0,51	1460	30	1458	24	1379	70	-5,42	0,50
14.	0,0612	0,0041	0,8340	0,0510	0,0998	0,002	0,33	611	30	613	12	530	140	-0,33	1,10
15.	0,0915	0,0051	3,5800	0,2000	0,2741	0,0061	0,40	1533	50	1560	31	1370	110	-12,18	0,66
16.	0,0708	0,0024	1,4070	0,0480	0,1431	0,0027	0,55	887	20	862	15	934	72	2,90	0,71
17.	0,1035	0,0017	4,6500	0,1300	0,3139	0,005	0,57	1757	22	1759	24	1679	29	-4,55	0,57
18.	0,1297	0,0043	6,7900	0,2200	0,3802	0,0084	0,68	2076	29	2075	39	2071	57	-0,19	0,60
19.	0,1259	0,003	6,9100	0,2100	0,3860	0,0078	0,66	2092	26	2102	37	2032	43	-3,33	0,60
20.	0,0786	0,0034	2,3300	0,1100	0,2080	0,005	0,51	1214	35	1217	27	1114	92	-8,46	0,76
21.	0,0620	0,0024	1,0760	0,0510	0,1211	0,0023	0,40	733	24	736	13	615	83	-0,41	0,68
22.	0,0754	0,0032	2,4100	0,1700	0,2129	0,005	0,33	1225	44	1243	26	1023	91	-17,70	0,28
23.	0,0882	0,0025	3,2400	0,1200	0,2543	0,0054	0,57	1460	30	1459	28	1363	58	-6,58	1,14
24.	0,0772	0,0028	2,3400	0,1000	0,2087	0,0042	0,47	1214	31	1225	23	1093	72	-10,78	0,14
25.	0,0677	0,0069	1,5500	0,1500	0,1616	0,006	0,38	932	69	964	33	630	220	-3,32	0,49
26.	0,1152	0,0032	6,0700	0,2900	0,3587	0,0069	0,40	1971	37	1974	33	1864	50	-5,57	0,22
27.	0,0855	0,0023	2,9500	0,1000	0,2413	0,0046	0,56	1386	26	1393	24	1312	52	-5,81	0,09
28.	0,1260	0,0054	6,6300	0,3100	0,3760	0,01	0,57	2052	44	2054	49	1998	77	-2,73	0,95
29.	0,0909	0,0045	3,4500	0,1800	0,2620	0,0067	0,49	1493	42	1497	34	1390	100	-7,15	1,35
30.	0,0565	0,0059	1,0300	0,1500	0,1145	0,0051	0,31	694	70	698	30	360	220	-0,57	0,84
31.	0,0695	0,0053	2,3200	0,2800	0,2114	0,0086	0,34	1196	83	1234	46	810	170	-34,36	0,32
32.	0,1009	0,0047	4,8600	0,3100	0,3240	0,013	0,63	1806	61	1807	63	1607	93	-11,07	0,85
33.	0,1177	0,0029	6,3600	0,3400	0,3656	0,0076	0,39	2007	40	2007	36	1905	45	-5,08	0,48
34.	0,1531	0,0045	10,6400	0,5900	0,4675	0,0098	0,38	2463	44	2468	43	2356	51	-4,54	0,30
35.	0,0896	0,0065	3,4400	0,2900	0,2675	0,0069	0,31	1467	69	1526	35	1220	160	-20,05	1,35
36.	0,0888	0,0032	3,3600	0,1500	0,2627	0,0056	0,48	1477	34	1502	28	1360	72	-9,45	1,26
37.	0,1213	0,0033	6,4000	0,2600	0,3700	0,0079	0,53	2017	35	2026	37	1954	50	-3,55	0,46
38.	0,0959	0,0044	3,9500	0,2600	0,2829	0,0078	0,42	1599	49	1603	39	1505	89	-6,11	0,61
39.	0,0691	0,0039	1,3230	0,0690	0,1412	0,0029	0,39	849	31	851	16	810	120	-0,24	0,72
40.	0,1236	0,0044	6,5300	0,3100	0,3724	0,0097	0,55	2035	40	2036	46	1972	65	-3,14	0,76
41.	0,1225	0,0033	6,1400	0,1900	0,3611	0,0072	0,64	1988	27	1991	32	1982	50	-0,45	0,39
42.	0,0928	0,0042	3,5100	0,1700	0,2682	0,0062	0,48	1512	38	1529	32	1428	90	-6,61	0,68
43.	0,0856	0,0032	2,7400	0,1100	0,2304	0,0053	0,57	1332	30	1336	28	1310	76	-1,95	0,26
44.	0,0623	0,0035	0,9550	0,0530	0,1107	0,0024	0,39	672	27	676	14	600	120	-0,59	1,10
45.	0,1314	0,0054	7,1600	0,3100	0,3902	0,0095	0,56	2124	39	2121	44	2093	76	-1,32	0,66
46.	0,0748	0,005	1,8500	0,1300	0,1764	0,0044	0,35	1042	46	1046	24	980	130	-6,31	0,94
47.	0,0602	0,005	0,8880	0,0700	0,1032	0,0031	0,38	633	37	633	18	450	170	0,00	0,90
48.	0,1883	0,0044	14,9900	0,4700	0,5500	0,012	0,70	2814	31	2819	49	2719	38	-3,55	0,77
49.	0,0583	0,004	0,8850	0,0650	0,1035	0,0024	0,32	629	34	635	14	410	140	-0,94	1,06

Табл. 2. Результаты U-Pb (LA-ICP-MS) датирования зерен детритового циркона из песчаников старопетровской свиты верхнего венда Волго-Уральской области. Примечание: для построения гистограммы использовались $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ возрасты для цирконов моложе 1000 млн лет и $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ возрасты для цирконов древнее 1000 млн лет с дискордантностью (D, %) в интервале -10%–10%. Серым цветом выделены измерения с дискордантностью >10%, исключенные из выборки. Зеленым цветом выделены измерения для цирконов на рис. 3

№ зерна	Изотопные отношения, абсолютные значения						Rho	Возраст, млн лет						D, %	Th/U
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2σ		
50.	0,2043	0,0048	16,4200	0,4600	0,5690	0,013	0,82	2896	28	2899	53	2852	39	-1,62	0,84
51.	0,2145	0,0041	14,8600	0,3800	0,4780	0,011	0,90	2799	23	2514	47	2935	32	16,75	0,67
52.	0,0604	0,0059	0,8300	0,0760	0,0982	0,0027	0,30	601	45	603	16	450	210	-0,33	0,65
53.	0,1650	0,0027	11,4100	0,2100	0,4862	0,0082	0,92	2555	17	2552	35	2507	29	-1,76	0,13
54.	0,1885	0,0057	14,3200	0,4200	0,5355	0,009	0,57	2767	27	2771	35	2718	50	-1,91	0,73
55.	0,0898	0,0046	2,9900	0,1300	0,2400	0,0055	0,53	1396	35	1386	28	1370	110	-1,15	0,55
56.	0,0769	0,0042	2,1400	0,1300	0,1995	0,0042	0,35	1147	42	1172	23	1040	120	-11,26	0,27
57.	0,1133	0,0034	5,0900	0,1600	0,3245	0,0062	0,61	1828	26	1810	30	1831	57	1,16	0,43
58.	0,0616	0,0049	0,9080	0,0750	0,1067	0,0027	0,31	653	37	653	16	600	160	0,00	0,97
59.	0,1392	0,0053	7,6500	0,3200	0,4020	0,01	0,59	2178	38	2175	47	2188	69	0,60	0,60
60.	0,1072	0,0058	4,5300	0,2600	0,3070	0,01	0,57	1727	49	1724	51	1720	110	-0,23	0,36
61.	0,0756	0,0032	1,7640	0,0790	0,1729	0,003	0,39	1026	29	1028	16	1044	87	1,56	0,39
62.	0,0699	0,0032	0,9080	0,0410	0,0964	0,0016	0,37	650	22	593	9,7	855	99	9,63	1,14
63.	0,0802	0,0037	2,4500	0,1400	0,2140	0,0058	0,47	1249	43	1249	31	1162	92	-6,97	0,64
64.	0,0793	0,0048	2,3100	0,1700	0,2043	0,0047	0,31	1196	54	1197	25	1100	130	-8,10	0,59
65.	0,0809	0,0029	2,4500	0,1100	0,2148	0,0045	0,47	1249	33	1253	24	1181	72	-5,75	0,31
66.	0,0860	0,0071	2,3000	0,1800	0,2059	0,0081	0,50	1199	58	1204	43	1190	170	-1,16	0,68
67.	0,0953	0,0061	3,2700	0,2000	0,2549	0,0065	0,42	1464	49	1462	33	1460	130	-0,14	2,43
68.	0,2613	0,0047	24,3700	0,5200	0,6870	0,011	0,75	3281	21	3369	43	3247	28	-3,62	0,50
69.	0,0936	0,0032	3,4200	0,1200	0,2635	0,005	0,54	1504	29	1507	25	1472	66	-2,32	1,22
70.	0,0905	0,0049	3,6800	0,2500	0,2722	0,0063	0,34	1545	52	1551	32	1390	110	-10,38	1,29
71.	0,0869	0,0067	3,4600	0,3100	0,2689	0,0093	0,39	1499	73	1533	47	1240	160	-19,11	1,15
72.	0,0578	0,0047	0,8760	0,0800	0,1008	0,0028	0,30	614	43	618	16	370	170	-0,65	1,08
73.	0,0579	0,0025	0,7700	0,0340	0,0938	0,0014	0,34	577	20	578	8,5	473	95	-0,14	0,74
74.	0,0623	0,0036	0,9550	0,0570	0,1109	0,0025	0,38	672	30	677	14	600	130	-0,74	1,14
75.	0,0871	0,0045	3,0000	0,1500	0,2432	0,0051	0,42	1396	40	1402	27	1290	110	-7,99	0,65
76.	0,0893	0,0037	3,4100	0,1700	0,2602	0,0054	0,42	1488	37	1489	28	1351	82	-9,27	0,35
77.	0,1218	0,005	6,5600	0,3000	0,3754	0,0096	0,56	2048	42	2060	47	1959	73	-4,90	1,22
78.	0,0540	0,0041	0,9120	0,0960	0,1053	0,004	0,36	642	47	645	23	320	170	-0,47	1,04
79.	0,0800	0,0028	2,4220	0,0920	0,2123	0,004	0,50	1239	27	1240	21	1149	71	-7,34	0,30
80.	0,1940	0,014	14,9000	1,1000	0,5380	0,022	0,55	2771	73	2770	96	2660	120	-3,97	1,39
81.	0,0595	0,0033	0,8730	0,0500	0,1030	0,0023	0,39	628	27	631	14	490	110	-0,48	0,66
82.	0,0786	0,0037	2,4500	0,1400	0,2146	0,0051	0,42	1252	42	1252	27	1115	92	-10,94	0,92
83.	0,0692	0,0047	0,9510	0,0640	0,0979	0,0024	0,36	664	33	602	14	750	140	10,30	1,10
84.	0,0601	0,0042	0,8840	0,0640	0,1036	0,002	0,27	635	35	635	12	490	150	0,00	0,56
85.	0,0640	0,0054	0,8860	0,0670	0,1046	0,0029	0,37	640	39	641	17	570	180	-0,16	0,60
86.	0,0635	0,0061	0,9030	0,0880	0,1037	0,003	0,30	637	47	636	18	570	200	0,16	1,11
87.	0,1260	0,013	4,7700	0,5100	0,2700	0,011	0,38	1660	100	1536	54	1710	240	11,33	2,88
88.	0,1356	0,0047	7,1400	0,2400	0,3904	0,0072	0,55	2121	30	2123	34	2157	60	1,60	0,47
89.	0,1012	0,0063	3,6200	0,2300	0,2668	0,0065	0,38	1540	54	1523	33	1580	130	3,74	1,24
90.	0,1389	0,007	7,2100	0,3600	0,3901	0,0092	0,47	2126	46	2121	43	2179	95	2,73	1,08
91.	0,1355	0,0059	6,9300	0,3900	0,3830	0,01	0,46	2093	49	2087	47	2172	86	4,07	0,71
92.	0,1076	0,0026	3,9500	0,1200	0,2738	0,005	0,60	1617	24	1559	25	1739	45	11,55	0,83
93.	0,0874	0,0058	2,5000	0,1600	0,2170	0,0058	0,42	1260	50	1264	31	1250	140	-1,11	0,34
94.	0,0664	0,0062	0,8760	0,0790	0,1017	0,0031	0,34	626	43	624	18	680	200	0,32	1,15
95.	0,1216	0,0044	5,2600	0,2000	0,3339	0,0076	0,60	1858	32	1856	37	1967	64	5,98	0,34
96.	0,0703	0,0053	0,8650	0,0630	0,0939	0,0017	0,25	618	34	578	10	760	150	6,92	0,86
97.	0,1953	0,0036	12,4600	0,2900	0,4780	0,0085	0,76	2643	23	2516	37	2777	30	10,37	0,75
98.	0,0684	0,0076	0,9300	0,1100	0,1033	0,0036	0,29	632	58	633	21	620	240	-0,16	0,91
99.	0,1341	0,0055	6,5600	0,3200	0,3720	0,011	0,61	2047	44	2039	54	2138	71	4,86	0,52
100.	0,0930	0,011	1,3700	0,1400	0,1086	0,0048	0,43	856	65	663	28	1190	230	29,11	0,71

Табл. 2. Продолжение

В пределах Волго-Уральской области надежные среднерифейские 1391–1386 млн лет изотопные U-Pb (SHRIMP-II) датировки по циркону и бадделеиту получены для даек, прорывающих нижнерифейские отложения норкинской и кабаковской свит и породы кристаллического фундамента в разрезах скважин 183 Мензелино-Актанышская (Puchkov et al., 2013) и 1 Восточно-Аскинская (Сергеева, Пучков 2016) (рис. 1, табл. 1).

Источники цирконов позднерифейского возрастного интервала 964–851 млн лет не установлены в местных питающих провинциях, но известны на северо-западе Восточно-Европейской платформы в пределах Свело-Норвежской области гренвилльского орогена. Доминирование детритового циркона этой достаточно удаленной области сноса ранее было отмечено для пород укской свиты верхнего рифея (Южный Урал), подстилающих вендские образования в регионе (Зайцева и др., 2022). Авторы допускают, что для старопетровской свиты источником цирконовой кластики могли быть магматические породы (1,22–0,95 млрд лет) Свело-Норвежского орогена. Транспортировка обломочного материала от этого удаленного источника, вероятно, могла осуществляться крупной трансконтинентальной рекой.

На кривой плотности относительной вероятности (рис. 4) в возрастном интервале 736–653 млн лет (завершающий рифей – аршиний) выделяется пик 734 млн

лет, который хорошо коррелируется с возрастом игонинских метабазальтов аршиния (732,1±1,7 и 707,0±2 млн лет) и гранитов Барангуловского (725,5±5 млн лет) и Мазаринского (745,8±4,9 млн лет) интрузивных массивов на Южном Урале и базальтов (734 млн лет) кипчакского вулканогенного комплекса, вскрытых скважиной 1 Кипчакская в пределах Волго-Уральской части ВЕП (Горожанин, 2009) (рис. 1, табл. 1).

Для ашинской серии венда, по данным (Кузнецов и др., 2012), источником dZr послужили кристаллические комплексы Протоуральско-Тиманского орогена (755–510 млн лет). Однако на Южном Урале тиманский орогенез, обусловленный коллизионными событиями (Пучков, 2010), начался значительно позднее 755 млн лет, нижнего рубежа Протоуральско-Тиманского орогена (Кузнецов и др., 2012). До начала коллизионных событий на Южном Урале (на восточной окраине Башкирского мегантиклинория) формируются вулканогенные (игонинский метабазальтовый комплекс с U-Pb SHRIMP-датировками по циркону 732,1±1,7 и 707,0±2,3 млн лет) и осадочные образования аршиния – стратона (750–640 млн лет), завершающего рифейскую эонотему (Козлов и др., 2011; Пучков и др., 2007; Краснобаев и др., 2012). Согласно представлениям (Пучков, 2016; Маслов и др., 2018), аршинские образования имеют рифтогенную природу и не могут принадлежать орогенному комплексу Протоуральско-Тиманского орогена.

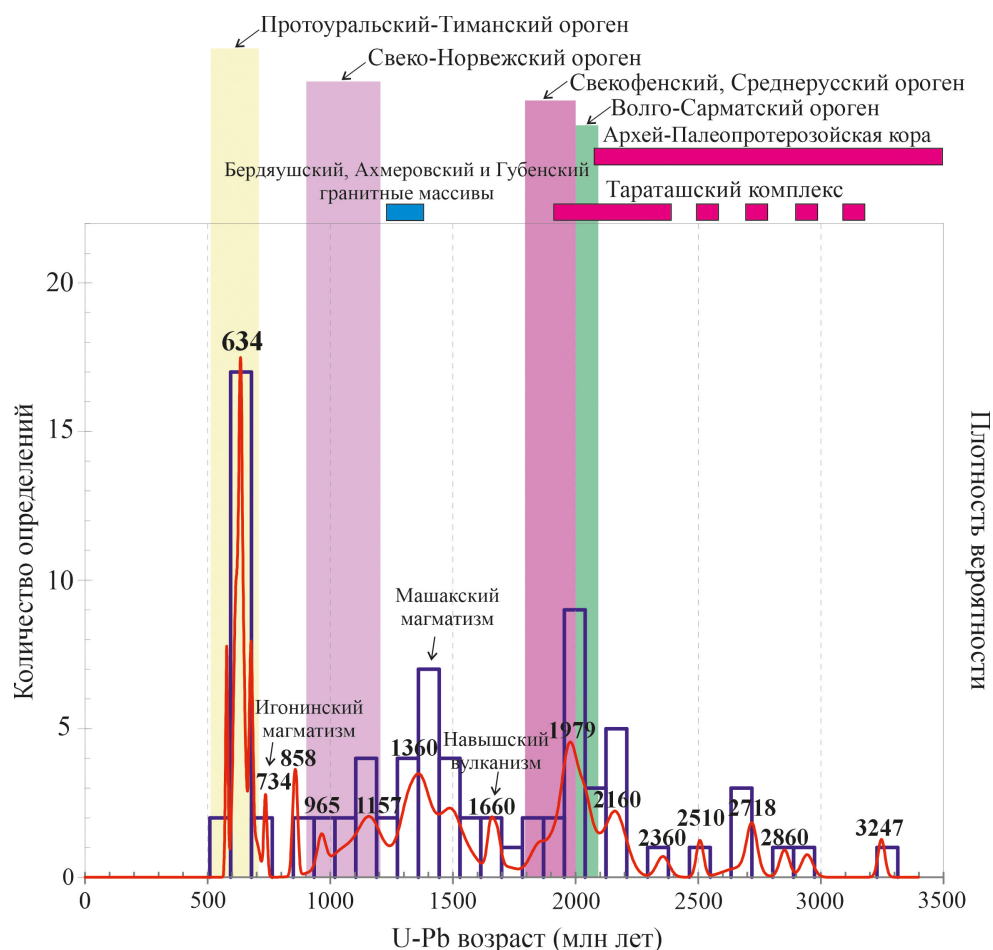


Рис. 4. Графики плотности относительной вероятности распределения U-Pb возрастов детритовых цирконов (dZr) из песчаников старопетровской свиты (проба SD-1-24). Примечание: красной линией показан возрастной спектр датировок на графике, количество измерений с близкими возрастными отражено на гистограмме (синяя линия). Возрастные границы орогенных комплексов выделены по данным (Кузнецов и др., 2012; Зайцева и др., 2022).

Наиболее яркий пик 634 млн лет на кривой плотности относительной вероятности получен для детритовых цирконов старопетровской свиты в возрастном интервале (643–603 млн лет), который отвечает нижнему венду. Источники цирконовой кластики этого возрастного интервала для осадочных пород старопетровской свиты среди магматических комплексов местных питающих провинций в пределах Южного Урала и сопредельной части Восточно-Европейской платформы не выявлены, что, по-видимому, связано с недостаточной изученностью магматических комплексов этого временного интервала в регионах. Однако, на Приполярном Урале широко распространены I-граниты (от кварцевых диоритов до лейкогранитов) и связанные с ними вулканы дифференцированных базальт-андезит-дацитовых серий с датировками по циркону в диапазоне от 695 ± 19 до 515 ± 8 млн лет, с подавляющим преобладанием вендских цифр (Соболева, 2004; Пучков, 2010). На Северном Тимане известны габброиды, сиениты и граниты, связанные с проявлением эпизода плюмового магматизма щелочной направленности (Андреичев, Соболева, 2023). Результаты датирования цирконов (Lagionov et al., 2004; Andreichev et al., 2020; Андреичев и др., 2021) свидетельствуют о времени их формирования в интервале 617–600 млн лет. Вероятно, перенос кластического материала из перечисленных комплексов играл значительную роль при формировании отложений старопетровской свиты

Для единичных датировок 578 и 577 млн лет источником циркона мог быть материал вулканических извержений, происходивших в период формирования осадка. Эти датировки характеризуют нижний возрастной предел старопетровской свиты и достаточно уверенно сопоставляются с басинской свитой Южного Урала, имеющей надежные оценки возраста (577–573 млн лет) по циркону из пепловых туфов (Рязанцев и др., 2023).

Выводы

В результате U-Pb (LA-ICP-MS) изотопно-геохронологических исследований детритовых цирконов из песчаников венда в разрезе скважины Красноуольская впервые получена информация о возрасте пород – источников цирконовой кластики для отложений старопетровской свиты Волго-Уральского осадочного бассейна.

Особенности распределения возрастных популяций детритовых цирконов из песчаников старопетровской свиты показали, что обломочный материал поступал в Волго-Уральский бассейн преимущественно за счет местных питающих провинций.

В качестве источников цирконовой кластики для палеопротерозойских и архейских (3247, 2944–2660 и 2507–1831 млн лет) возрастных популяций цирконов для осадочных пород старопетровской свиты предполагаются архей-нижнепротерозойские образования Тараташского и Александровского метаморфических комплексов Южного Урала и выступы пород кристаллического фундамента юго-восточной части Восточно-Европейской платформы

Для цирконов с возрастными 1720–1472 млн лет в качестве источника цирконового детрита рассматриваются базальты навышского вулканогенного комплекса (1752 млн лет) на Южном Урале, а также базальты актанышского

вулканогенного комплекса, вскрытые в скважине 203 Мензелино-Актанышская в ВУО (рис. 1, табл. 1).

Среди источников dZr для рассматриваемых отложений важная роль принадлежит среднерифейским магматическим комплексам (1400–1030 млн лет), развитым на Урале и в Волго-Уральской области (дайки в разрезе скважин 183 Мензелино-Актанышская и 1 Восточно-Аскинская, рис. 1, табл. 1).

Популяция dZr в возрастных границах 736–653 млн лет могли формироваться за счет разрушения в области сноса metabазальтов и габбро игонинского комплекса и гранитов Барангуловского и Мазаринского массивов на Южном Урале, а также базальтов кипчакского вулканогенного комплекса, вскрытых скважиной 1 Кипчакская ВУО (рис. 1, табл. 1).

Для цирконов с возрастными датировками в интервале 964–851 млн лет не установлены источники цирконовой кластики в местных питающих провинциях. Допускается, что источником цирконовой кластики (964–851 млн лет) могли быть магматические породы (1,22–0,95 млрд лет) Свеко-Норвежского орогена.

Источники цирконов с вендскими датировками (643–603 млн лет) среди магматических комплексов местных питающих провинций не выявлены в пределах южной части Урала и сопредельной части Восточно-Европейской платформы, но установлены на Приполярном Урале и Северном Тимане.

Для единичных датировок 578 и 577 млн лет источником циркона мог быть пепловый материал вулканических извержений в период формирования осадков старопетровской свиты. Эти датировки характеризуют нижний возрастной предел старопетровской свиты и позволяют коррелировать её с басинской свитой Южного Урала, имеющей надежную оценку возраста (577–573 млн лет) по циркону из пепловых туфов.

Полученные данные свидетельствуют о необходимости дальнейших изотопно-геохронологических исследований вендских отложений для решения стратиграфических задач, уточнения времени и условий формирования вендских отложений в Волго-Уральском осадочном бассейне. Именно с вендскими отложениями связаны на платформе многочисленные проявления нефти и газа, что делает вендские отложения привлекательным объектом на поиски углеводородов в Волго-Уральской нефтегазоносной провинции с развитой инфраструктурой.

Финансирование/Благодарность

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 24-27-00311, <https://rscf.ru/project/24-27-00311/>.

Авторы выражают благодарность рецензентам за рассмотрение рукописи и полезные рекомендации, которые позволили улучшить текст и презентацию материала.

Литература

Аксенов Е.М. (1998). История геологического развития Восточно-Европейской платформы в позднем протерозое. Дисс. д.г.-м.н. Санкт-Петербург, 107 с.

Андреичев В.Л., Соболева А.А. (2023). Возраст габбро-долеритов массива Сопки Каменные (Северный Тиман) по результатам U-Pb (SIMS) датирования циркона. *Труды Фермановской научной сессии ГИ КНЦ РАН*, 20, с. 263–270. <https://doi.org/10.31241/FNS.2023.20.034>

- Андреичев В.Л., Соболева А.А., Удоратина О.В., Ронкин Ю.Л. (2021). Цирконология сиенитов Северного Тимана. *Вестник Геонаук*, 6(318), с. 16–27. DOI: 10.19110/geov.2021.6.2
- Башкова С.Е., Карасева Т.В. (2023). Прогноз нефтегазоносности рифей-вендских отложений Волго-Уральской нефтегазоносной провинции. Пермь: ПГНИУ, 190 с.
- Беккер Ю.Р. (1968). Позднедокембрийская моласса Южного Урала. Л.: Недра, 160 с.
- Беккер Ю.Р. (1988). Молассы докембрия. Л.: Недра, 288 с.
- Богданова С.В. (1986). Земная кора Русской плиты в раннем докембрии (на примере Волго-Уральского сегмента). М.: Наука, 226 с.
- Бибикова Е.В., Богданова С.В., Кириозова Т.И., Попова Л.П. (1984). Уран-свинцовый возраст чарнокитовидов Волго-Уральской области. *Доклады АН СССР*, 276(4), с. 916–919.
- Горожанин В.М. (2009). Rb-Sr датирование неопротерозойских вулканитов по поствулканическому селадониту: скв. Кипчак 1, Серноводско-Абдулинский авлакоген. *Мат-лы IV Российской конференции по изотопной геохронологии «Изотопные системы и время геологических процессов»*, с. 145–147.
- Дополнения к Стратиграфическому кодексу России. (2000). СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 112 с.
- Зайцева Т.С., Горохов И.М., Ивановская Т.А., Семихатов М.А., Кузнецов А.Б., Мельников Н.Н., Аракелянц М.М., Яковлева О.В. (2008). Мессбауровские характеристики, минералогия и изотопный возраст (Rb-Sr, K-Ar) верхнерифейских глауконитов укской свиты Южного Урала. *Стратиграфия. Геологическая корреляция*, 16(3), с. 3–25.
- Зайцева Т.С., Кузнецов А.Б., Горожанин В.М., Горохов, И.Н., Ивановская Т.А., Константинова Г.В. (2019). Основание венда на Южном Урале: Rb-Sr возраст глауконитов бакеевской свиты. *Стратиграфия. Геологическая корреляция*, 27(5), с. 82–96. DOI: 10.31857/S0869-592X27582-96
- Зайцева Т.С., Кузнецов А.Б., Сергеева Н.Д., Адамская Е.В., Плоткина Ю.В. (2022). U-Th-Pb-возраст детритового циркона из оолитовых известняков укской свиты: следы гренвилльских источников сноса в позднем рифее Южного Урала. *Доклады Академии наук. Науки о Земле*, 503(2), с. 90–96. DOI: 10.31857/S2686739722040193
- Казakov Г.А., Кнорре К.Г., Стрижов В.П. (1976). Новые данные о возрасте нижних свит нижнебавлинской серии Волго-Уральской области. *Геохимия*, 4, с. 482–485.
- Козлов В.И. (2004). Стратиграфия додевонских осадочных толщ западного Башкортостана. Первые Тимергазинские чтения. *Геология, полезные ископаемые и проблемы экологии Башкортостана: Матер. конф.*, 20–21 ноября, с. 45–82.
- Козлов В.И. (2008). Корреляция разрезов и обоснование возраста отложений кыргинской серии западного Башкортостана и смежных районов Волго-Уральской области (по данным бурения глубоких скважин). *Известия отделения наук о Земле. Геология*, 13, с. 58–72.
- Козлов В.И., Муслимов Р.Х., Гатиятуллин Н.С., Генина Л.А., Сергеева Н.Д., Ларионов Н.Н., Михайлов П.Н., Баранов В.В. (1995). Верхний докембрий восточных районов Татарстана и перспективы его нефтегазоносности. Уфа: ИГ УНЦ РАН, 218 с.
- Козлов В.И., Иванова Т.В., Горохов И.М., Масагутов Р.Х., Сергеева Н.Д., Овчинникова Г.В., Кузнецов А.Б., Генина Л.А., Михайлов П.Н., Илеменова О.Д. (2003). Литолого-петрографическая характеристика и перспективы нефтегазоносности доверхнедевонских отложений, вскрытых скважиной 1 Леузинская. УНЦ РАН, ООО «ИК БашНИПИнефть», ИГГД РАН, 40 с.
- Козлов В.И., Пучков В.Н., Краснобаев А.А., Нехорошева А.Г., Бушарина С.В. (2011). Аршиний — новый стратон рифея в стратотипических разрезах Южного Урала. *Геологический сборник ИГ УНЦ РАН*, 9, с. 52–56.
- Козлов В.И., Сергеева Н.Д. (2010). Нижний рифей северных районов Волго-Уральской области. *Геология и нефтегазоносность северных районов Урало-Поволжья. Сб. материалов Всероссийской научно-практической конференции*. Пермь: Изд-во ПГУ, с. 45–49.
- Козлова Е.В. (1990). Находки микрофоссилий в рифейских отложениях востока Русской плиты. *Геология докембрия Южного Урала и востока Русской плиты*. Уфа: ИГ УНЦ РАН, с. 50–56.
- Краснобаев А.А., Козлов В.И., Пучков В.Н. (2008). Машакский вулканизм: ситуация 2008. *Структурно-вещественные комплексы и проблемы геодинамики докембрия фанерозойских орогенов: Мат-лы научной конференции «3-и чтения памяти С.Н. Иванова»*. Екатеринбург, с. 61–63.
- Краснобаев А.А., Попов В.С., Беляцкий Б.В. (2011). Хронологические и генетические соотношения интрузивных пород Бердяшского плутона (Южный Урал) в свете новых U-Pb и Sm-Nd изотопных данных. *ЗРМО, СХХХ*, 2, с. 59–73.
- Краснобаев А.А., Козлов В.И., Пучков В.Н., Сергеева Н.Д., Бушарина С.В. (2012). Новые данные по цирконовой геохронологии аршинских вулканитов (Южный Урал). *Литосфера*, 4, с. 127–140.
- Краснобаев А.А., Козлов В.И., Пучков В.Н., Бушарина С.В., Сергеева Н.Д., Падерин И.П. (2013а). Цирконовая геохронология машакских вулканитов и проблема возраста границы нижний-средний рифей (Южный Урал). *Стратиграфия. Геологическая корреляция*, 21(5), с. 3–20 DOI: 10.7868/S0869592X13050050
- Краснобаев А.А., Пучков В.Н., Козлов В.И., Сергеева Н.Д., Бушарина С.В., Лепехина Е.Н. (2013б). Цирконология навьшских вулканитов айской свиты и проблема возраста нижней границы рифея на Южном Урале. *Доклады Академии наук*, 448(4), с. 437–442. DOI: 10.7868/S086956521304021X
- Краснобаев А.А., Пучков В.Н., Сергеева Н.Д., Бушарина С.В. (2019). Источники цирконов в обломочных породах рифейских толщ Урала. *Доклады Академии наук*, 488(4), с. 413–419. DOI: 10.31857/S0869-56524884413-419
- Кузнецов Н.Б., Романюк Т.В., Шацилло А.В., Орлов С.Ю., Голованова И.В., Данукалов К.Н., Ипатьева И.С. (2012). Первые результаты массового U/Pb-изотопного датирования (LA-ICP-MS) детритных цирконов из ашинской серии Южного Урала: палеогеографический и палеотектонический аспекты. *Доклады Академии наук*, 447(1), с. 73–79.
- Кухаренко А.А. (1961). Минералогия россыпей. М.: Госгеолтехиздат, 316 с.
- Лагутенкова Н.С., Чепикова И.К. (1982). Верхнедокембрийские отложения Волго-Уральской области и перспективы их нефтегазоносности. М.: Наука, 112 с.
- Ляхович В.В. (1981). Методы сепарации аксессуарных минералов. М.: Недра, 86 с.
- Маслов А.В., Ковалев С.Г., Пучков В.Н., Сергеева Н.Д. (2018). Аршинская серия рифея Южного Урала: к вопросу о геодинамической природе породных ассоциаций. *Доклады Академии наук*, 480(1), с. 64–68. DOI: 10.7868/S0869565218130133
- Пучков В.Н. (2000). Палеогеодинамика Южного и Среднего Урала. Уфа: Даурия, 146 с.
- Пучков В.Н. (2010). Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 280 с.
- Пучков В.Н. (2016). Взаимосвязь плитных и плюмовых процессов в глобальном и региональном масштабе. Плюмовые процессы на Урале. *Металлогения древних и современных океанов*, 1, с. 17–21.
- Пучков, В.Н., Козлов В.И. (2005). Особенности тектоники Волго-Уральской нефтегазоносной области. *Георесурсы*, 1(16), с. 24–27.
- Пучков В.Н., Краснобаев А.А., Козлов В.И., Матуков Д.И., Нехорошева А.Г., Лепехина Е.Н., Сергеев С.А. (2007). Предварительные данные о возрастных рубежах нео- и мезопротерозоя Южного Урала в свете новых U-Pb датировок. *Геологический сборник ИГ УНЦ РАН*, 6, с. 3.
- Пучков В.Н., Сергеева Н.Д. (2021). Изотопный возраст вулканогенных образований рифея на Южном Урале и значение событийной стратиграфии в уточнении стратиграфической шкалы. *Материалы VII Российской конференции по проблемам геологии докембрия: Стратиграфия верхнего докембрия: проблемы и пути решения*. Санкт-Петербург: Свое издательство, с. 155–158.
- Разумовский А.А., Новиков И.А., Рудько С.В., Кузнецов Н.Б., Яшунский Ю.В. (2020). U-Pb изотопный возраст пепловых туфов поздневендской басинской свиты (ашинская серия, Южный Урал). *Материалы 52-го тектонического совещания*, 2, с. 219–224.
- Ронкин Ю.Л., Синдерн С., Маслов А.В., Матуков Д.И., Крамм У., Лепихина О.П. (2007). Древнейшие (3,5 млрд лет) цирконы Урала: U-Pb (SHRIMP-II) и T_{DM} ограничения. *Докл. АН*, 415(5), с. 651–657.
- Рязанцев А.В., Разумовский А.А., Новиков И.А., Куртукова А.И., Каньгина Н.А., Яшунский Ю.В., Дубенский А.С., Шешуков В.С. (2023). Возраст вулканических туфов в разрезах басинской и зиганской свит ашинской серии венда (эдиакрия) на Южном Урале: результаты U-Th-Pb (SIMS и La-ICP-MS) датирования аксессуарного циркона. *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*, 508(1), с. 68–78. DOI: 10.31857/S2686739722602149
- Сергеева Н.Д., Пучков В.Н., Краснобаев А.А., Козлова О.В., Ратов А.А. (2019). Ашинская серия венда: орогенный комплекс тиманид на Южном Урале. *Геологический вестник*, 1, с. 3–34. DOI: 10.31084/2619-0087-2019-1-1
- Сергеева Н.Д., Пучков В.Н. (2016). Стратиграфия рифея и венда Волго-Уральской области (изменения и дополнения). *Материалы межведомственного рабочего совещания: Общая стратиграфическая шкала и методические проблемы разработки региональных стратиграфических шкал России*, с. 157–159.

Сергеева Н.Д., Пучков В.Н., Карасева Т.В. (2021). Верхний протерозой (рифей и венд) Волго-Уральской области в параметрических и глубоких скважинах. Уфа: Книга-Принт, 196 с.

Сергеева Н.Д., Солодова С.А. (2020). Литолого-петрографическая характеристика и стратиграфическое расчленение допалеозойских отложений в разрезе скважины 40 Красноустьевская (Предуральский краевой прогиб). *Геологический вестник*, 3, с. 55–67. DOI: 10.31084/2619-0087/2020-3-4

Синдерн С., Ронкин Ю.Л., Хетцель Р., Шульте Б.А., Крамм У., Маслов А.В., Лепехина О.П., Попова О.Ю. (2006). Тараташский и Александровский метаморфические комплексы (Южный Урал): Т—t ограничения. *Ежегодник—2005*. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, с. 322–330.

Соболева А.А. (2004). Вулканы и ассоциирующие с ними гранитоиды приполярного Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 146 с.

Стратиграфическая схема рифейских и вендских отложений Волго-Уральской области (2000). Объяснительная записка. Уфа, 81 с.

Стратиграфические схемы Урала (Докембрий, палеозой) (1993). Екатеринбург: МСК России, 152 с.

Стратиграфический кодекс России (2019). СПб: ФГБУ «ВСЕГЕИ», 96 с.

Стратотип рифея. Стратиграфия. Геохронология (1983). М.: Наука, 183 с.

Тевелев Ал.В., Кошелева И.А., Тевелев Арк.В., Хотылев А.О., Мосейчук В.М., Петров В.И. (2015). Новые данные об изотопном возрасте тараташского и александровского метаморфических комплексов (Южный Урал). *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология*, 1, с. 27–42.

Янкаускас Т.В. (1982). Микрофоссилии рифея Южного Урала. М.: Наука, Стратотип рифея: Палеонтология и палеомагнетизм, с. 84–120.

Andreichev V.L., Soboleva A.A., Udoratina O.V., Ronkin Yu.L., Coble M.A., Miller E.L. (2020). Granites of the Northern Timan – probable indicators of Neoproterozoic stages of Rodinia breakup. *Geodynamics & Tectonophysics*, 11(2), pp. 10–28. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-2-0470>

Ernst R.E., Pease V., Puchkov V.N., Kozlov V.I., Sergeeva N.D., Hamilton M. (2006). Geochemical Characterization of Precambrian magmatic suites of the southeastern margin of the East European Craton, Southern Urals, Russia. *Geologicheskyy sbornik*, 5, pp. 119–161. https://repository.geologyscience.ru/bitstream/handle/123456789/44398/Erns_06.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Ernst R.E., Hanes G.A., Puchkov V.N., Okrugin A.V., Archibald D.A. (2008). Reconnaissance Ar–Ar dating of Proterozoic dolerite dikes and sills in Siberia and Southern Urals: identification of new LIPs and application for a reconstruction of Nuna (Columbia) supercontinent. *Proc. Conference of the Tectonic Committee*. Moscow: GEOS, pp. 205–208.

Hiess J., Condon D.J., McLean N., Noble S.R. (2012). ²³⁸U/²³⁵U systematics in terrestrial uranium-bearing minerals. *Science*, 335(6076), pp. 1610–1614. DOI: 10.1126/science.1215507

Kuznetsov A. B., Bekker A., Ovchinnikova G. V., Gorokhov I. M., Vasilyeva I. M. (2017). Unradiogenic strontium and moderate-amplitude carbon isotope variations in early Tonian seawater after the assembly of Rodinia and before the Bitter Springs Excursion. *Precambrian Research*, 298, pp. 157–173. doi: 10.1016/j.precamres.2017.06.011

Larionov A.N., Andreichev V.L., Gee D.G. (2004). The Vendian alkaline igneous suite of northern Timan: ion microprobe U-Pb zircon ages of gabbros and syenite. The Neoproterozoic Timanide Orogen of Eastern Baltica. Eds. Gee D.G., Pease V. *Geol. Soc. London. Mem.*, 30, pp. 69–74. <https://doi.org/10.1144/GSL.MEM.2004.030.01.07>

Levashova N.M., Bazhenov M.L., Meert J.G., Kuznetsov N.B., Golovanova I.V., Danukalov K.N., Fedorova N.M. (2013). Paleogeography of Baltica in the Ediacaran: Paleomagnetic and geochronological data from the clastic Zigan Formation, South Urals. *Precambrian Research*, 236, pp. 16–30. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2013.06.006>

Ludwig K.R. (2003). User's manual for Isoplot/Ex version 3.00, a geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publications, 4, 72 p.

Paton Ch., Woodhead J.D., Hellstrom J.C., Herg J.M., Greig A., Maas R. (2010). Improved laser ablation U-Pb zircon geochronology through robust downhole fractionation correction. *Geochemistry: Geophysics. Geosystems*, 11(3), pp. 1–36. <https://doi.org/10.1029/2009gc002618>

Puchkov V.N., Kozlov V.I., Sergeeva N.D., Bogdanova S.V., Söderlund U., Ernst R.E., Krasnobayev A.A., Postnikov A.V., Wingate M.T.D. (2013). The ca. 1380 Ma Mashak igneous event of the Southern Urals. *Lithos*, 174, pp. 109–124. DOI: 10.1016/j.lithos.2012.08.021

Puchkov V.N., Ernst R.E., Ivanov K.S. (2021). The importance and difficulties of identifying mantle plumes in orogenic belts: An example based on the fragmented large igneous province (LIP) record in the Ural fold belt. *Precambrian Research*, 361, 106186. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2021.106186>

Sláma J., Košler J., Condon D. J., Crowley J. L., Gerdes A., Hanchar J. M., Horstwood M. S. A., Morris G. A., Nasdala L., Norberg N., Schaltegger U., Schoene B., Tubrett M.N., Whitehouse, M.J. (2008). Plešovice zircon—a new natural reference material for U–Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chemical geology*, 249(1–2), pp. 1–35. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.11.005>

Sperling E.A., Rooney A.D., Hays L., Sergeev V.N., Vorob'eva N.G., Sergeeva N.D., Selby D., Johnston D.T., Knoll A.H. (2014). Redox heterogeneity of subsurface waters in the Mesoproterozoic ocean. *Geobiology*, 12(5), pp. 373–386. <https://doi.org/10.1111/gbi.12091>

Warr L.N. (2021). IMA-CNMNC approved mineral symbols. *Mineralogical Magazine*, 85, pp. 291–320. <https://doi.org/10.1180/mgm.2021.43>

Wiedenbeck M. Allé P., Corfu F., Griffin W.L., Meier M., Oberli F., Von Quadt A., Roddick J.C., Spiegel W. (1995). Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. *Geostandards newsletter*, 19(1), pp. 1–23. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.1995.tb00147.x>

Сведения об авторах

Светлана Андреевна Дьякова – младший научный сотрудник, Институт геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН

Россия, 450077, Уфа, ул. Карла Маркса, д. 16/2

e-mail: solodova.IG@yandex.ru

Нина Дмитриевна Сергеева – кандидат геол.-минерал. наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН
Россия, 450077, Уфа, ул. Карла Маркса, д. 16/2
e-mail: riphey@ufaras.ru

Анна Викторовна Куликова – кандидат геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник, НОЦ «Геотермохронология» Института геологии и нефтегазовых технологий, Казанский (Приволжский) федеральный университет

Россия, 420111, Казань, ул. Кремлевская, д. 4

e-mail: Ak_Cool@mail.ru

Павел Алексеевич Красильников – младший научный сотрудник, НОЦ «Геотермохронология» Института геологии и нефтегазовых технологий, Казанский (Приволжский) федеральный университет

Россия, 420111, Казань, ул. Кремлевская, д. 4

e-mail: krasilnikovp290@gmail.com

Милана Рустамовна Лукманова – лаборант-исследователь, Институт геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН; студент, кафедра геологии, гидрометеорологии и геоэкологии Института природы и человека, Уфимский университет науки и технологий
Россия, 450077, Уфа, ул. Карла Маркса, д. 16/2
e-mail: riphey@ufaras.ru

Тимур Ринатович Абдеев – лаборант-исследователь, Институт геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН; студент, кафедра геологии, гидрометеорологии и геоэкологии Института природы и человека, Уфимский университет науки и технологий
Россия, 450077, Уфа, ул. Карла Маркса, д. 16/2
e-mail: riphey@ufaras.ru

Статья поступила в редакцию 16.11.2024;

Принята к публикации 29.04.2025;

Опубликована 20.09.2025

The first results of U-Pb (LA-ICP-MS) dating of detrital zircons from sandstones of the Staropetrovo Formation of the Vendian Volga-Uralian sedimentary basin and potential sources of zircon clusters

S.A. Dyakova^{1*}, N.D. Sergeeva¹, A.V. Kulikova², M.R. Lukmanova^{1,3}, T.R. Abdeev^{1,3}, P.A. Krasilnikov²

¹Institute of Geology of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russian Federation

²Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation

³Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation

*Corresponding author: Svetlana A. Dyakova, e-mail: solodova.IG@yandex.ru

Abstract. For the first time, information on the age of rocks – sources of zircon clastics for deposits of the Staropetrovo Formation of the Vendian Volga-Uralian sedimentary basin was obtained. As a result of U-Pb (LA-ICP-MS) dating of detrital zircons from sandstones of the Staropetrovo Formation in the well Krasnousolsk, located in the Pre-Uralian marginal trough, a wide time range of zircon clastic ages was obtained: from the Archean – 3247 million years to the Vendian – 577 million years. Features of the distribution of age populations of zircons from sandstones of the Staropetrovo Formation indicated the influx of detrital material into the Volga-Uralian basin mainly from local feeding provinces. The source of zircons of the most ancient (1831–2507 million years and 2660–2944 million years) population for sandstones of the Staropetrovo Formation is assumed to be the Archean-Paleoproterozoic formations of the Taratash metamorphic complex of the Southern Urals and crystalline rocks of the basement of the Volga-Uralian area. For detrital zircons with ages of 1472–1720 Ma, 1044–1390 Ma, and 653–736 Ma, corresponding to the early, middle, and final Riphean, the intrusive and volcanic formations of the Navysh, Mashak, and Igonino igneous complexes of the Riphean in the Southern Urals, which have modern isotopic datings for zircon and baddeleyite, and the basalts of the Aktanysh (well 203 Menzelino-Aktanysh) and Kipchak (well 1 Kipchak) volcanic complexes of the Volga-Ural region are considered as potential sources of zircon clastics, as well as the basalts of the Aktanysh (well 203 Menzelino-Aktanysh) and Kipchak (well 1 Kipchak) volcanic complexes of the Volga-Uralian area. In local feeding provinces, zircon sources with ages of 851–964 Ma and 603–643 Ma have not been established, which is most likely due to insufficient isotope-geochronological study of sedimentary and igneous complexes of the Precambrian of the East-European platform and its folded frame. Among the Precambrian formations, a special place is occupied by Vendian deposits, to which numerous manifestations of oil and gas are confined in the Volga-Uralian area, which makes Vendian deposits an attractive object for hydrocarbon exploration.

Keywords: detrital zircon, dating, LA-ICP-MS, Staropetrovo Formation, Vendian, Volga-Uralian area

Acknowledgements

The collection of materials and analytical works were funded by the grant of the Russian Science Foundation No. 24-27-00311, <https://rscf.ru/project/24-27-00311/>.

The authors would like to thank the reviewers for reviewing the manuscript and making useful recommendations that helped to improve the text and presentation of the material.

Recommended citation: Dyakova S.A., Sergeeva N.D., Kulikova A.V., Lukmanova M.R., Abdeev T.R., P.A. Krasilnikov (2025). The first results of U-Pb (LA-ICP-MS) dating of detrital zircons from sandstones of the Staropetrovo Formation of the Vendian Volga-Uralian sedimentary basin and potential sources of zircon clusters. *Georesursy = Georesources*, 27(3), pp. 195–208. <https://doi.org/10.18599/grs.2025.3.21>

References

- Additions to the Stratigraphic Code of Russia. (2000). St. Petersburg: VSEGEI Publishing House, 112 p. (In Russ.).
- Aksenov E.M. (1998). History of geological development of the East-European platform in the late Proterozoic. Dr. geol. and min. sci. diss. St. Petersburg, 107 p. (In Russ.).
- Andreichev V.L., Soboleva A.A. (2023). The age of gabbro-dolerites of the Sopki Kamennyye massif (Northern Timan) according to the results of U-Pb (SIMS) dating of zircon. *Trudy Fersmanovskoy nauchnoy sessii GI KNTs RAN*, 20, pp. 263–270. (In Russ.) <https://doi.org/10.31241/FNS.2023.20.034>
- Andreichev V.L., Soboleva A.A., Udoratina O.V., Ronkin Yu.L. (2021). The zirconology of the syenites of the Northern Timan. *Vestnik Geonauk*, 6(318), pp. 16–27. (In Russ.) DOI: 10.19110/geov.2021.6.2
- Andreichev V.L., Soboleva A.A., Udoratina O.V., Ronkin Yu.L., Coble M.A., Miller E.L. (2020). Granites of the Northern Timan – probable indicators of Neoproterozoic stages of Rodinia breakup. *Geodynamics & Tectonophysics*, 11(2), pp. 10–28. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-2-0470>
- Bashkova S.E., Karaseva T.V. (2023). Oil and gas potential of the Riphean-Vendian deposits of the Volga-Uralian oil and gas province. Perm: PSNRU, 190 p. (In Russ.).
- Bekker Yu.R. (1968). Late Precambrian molasse of the Southern Urals. Leningrad: Nedra, 160 p. (In Russ.).
- Bekker Yu.R. (1988). Precambrian molasses. Leningrad: Nedra, 288 p. (In Russ.).
- Bibikova E.V., Bogdanova S.V., Kirnozova T.I., Popova L.P. (1984). Uranium-plumbum age of charnockitoids of the Volga-Uralian area. *Doklady AN SSSR*, 276(4), pp. 916–919. (In Russ.).
- Bogdanova S.V. (1986). The Earth's crust of the Russian plate in the early Precambrian (on the example of the Volga-Uralian segment). Moscow: Nauka, 226 p. (In Russ.).
- Ernst R.E., Pease V., Puchkov V.N., Kozlov V.I., Sergeeva N.D., Hamilton M. (2006). Geochemical Characterization of Precambrian magmatic suites of the southeastern margin of the East European Craton, Southern Urals, Russia. *Geologicheskyy sbornik*, 5, pp. 119–161. https://repository.geologyscience.ru/bitstream/handle/123456789/44398/Erns_06.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Ernst R.E., Hanes G.A., Puchkov V.N., Okrugin A.V., Archibald D.A. (2008). Reconnaissance Ar–Ar dating of Proterozoic dolerite dikes and sills in Siberia and Southern Urals: identification of new LIPs and application for a reconstruction of Nuna (Columbia) supercontinent. *Proc. Conference of the Tectonic Committee*. Moscow: GEOS, pp. 205–208.

- Gorozhanin V.M. (2009). Rb-Sr dating of Neoproterozoic volcanics by postvolcanic celadonite: Kipchak 1 well, Sernovodsk-Abdulino aulacogen. *Proc. IV Russian Conference on Isotope Geochronology "Isotope Systems and Time of Geological Processes"*. pp. 145–147. (In Russ.)
- Hiess J., Condon D.J., McLean N., Noble S.R. (2012). ²³⁸U/²³⁵U systematics in terrestrial uranium-bearing minerals. *Science*, 335(6076), pp. 1610–1614. DOI: 10.1126/science.1215507
- Kazakov G.A., Knorre K.G., Strizhov V.P. (1976). New data on the age of the lower formations of the Nizhnebavlnsky series of the Volga-Uralian area. *Geokhimiya*, 4, pp. 482–485. (In Russ.)
- Kozlov V.I. (2004). Stratigraphy of pre-Devonian sedimentary strata of western Bashkortostan. First Timergazin Readings. *Proc. conf.: Geology, mineral resources and environmental problems of Bashkortostan*, November 20–21, pp. 45–82. (In Russ.)
- Kozlov V.I. (2008). Correlation of sections and substantiation of the age of deposits of the Kyrpinskaya series of western Bashkortostan and adjacent areas of the Volga-Uralian area (based on deep well drilling data). *Izvestiya otdeleniya nauk o Zemle. Geologiya*, 13, pp. 58–72. (In Russ.)
- Kozlov V.I., Ivanova T.V., Gorokhov I.M., Masagutov R.Kh., Sergeeva N.D., Ovchinnikova G.V., Kuznetsov A.B., Genina L.A., Mikhailov P.N., Ilemenova O.D. (2003). Lithological and petrographic characteristics and prospects for oil and gas potential of pre-Devonian sediments penetrated by well 1 Leuzinskaya. UC RAS, LLC "IK BashNIPneft", IGGD RAS, 40 p. (In Russ.)
- Kozlov V.I., Muslimov R.Kh., Gatiyatullin N.S., Genina L.A., Sergeeva N.D., Larionov N.N., Mikhailov P.N., Baranov V.V. (1995). Upper Precambrian of the eastern regions of Tatarstan and prospects for its oil and gas potential. Ufa: IG UC RAS, 218 p. (In Russ.)
- Kozlov V.I., Puchkov V.N., Krasnobaev A.A., Nekhorosheva A.G., Busharina S.V. (2011). Arsha Group — a new Riphean straton in the stratotype sections of the Southern Urals. *Geologicheskii sbornik IG UNTs RAN*, 9, pp. 52–56. (In Russ.)
- Kozlov V.I., Sergeeva N.D. (2010). Lower Riphean of the northern regions of the Volga-Uralian area. *Proc. All-Russian scientific and practical conference: Geology and oil and gas potential of the northern regions of the Ural-Volga region*. Perm: Publishing house of PSU, pp. 45–49. (In Russ.)
- Kozlova E.V. (1990). Microfossil finds in Riphean deposits of the eastern Russian Plate. *Precambrian geology of the Southern Urals and the east of the Russian Plate*. Ufa: IG USC RAS, pp. 50–56. (In Russ.)
- Krasnobaev A.A., Kozlov V.I., Puchkov V.N. (2008). Mashak volcanism: situation in 2008. *Proc. Scientific Conference: Structural-material complexes and problems of Precambrian geodynamics of Phanerozoic orogens "3rd Readings in memory of S.N. Ivanov"*. Ekaterinburg, pp. 61–63. (In Russ.)
- Krasnobaev A.A., Kozlov V.I., Puchkov V.N., Busharina S.V., Sergeeva N.D., Paderin I.P. (2013a). Zircon geochronology of the Mashak volcanic rocks and the problem of the age of the lower-middle Riphean boundary (Southern Urals). *Stratigr. Geol. Correl.*, 21, pp. 465–481. <https://doi.org/10.1134/S0869593813050055>
- Krasnobaev A.A., Kozlov V.I., Puchkov V.N., Sergeeva N.D., Busharina S.V. (2012). New data on zircon geochronology of the Arshinian volcanics (Southern Urals). *Litosfera*, 4, pp. 127–140. (In Russ.)
- Krasnobaev A.A., Popov V.S., Belyatsky B.V. (2011). Chronological and genetic relationships of intrusive rocks of the Berdyush pluton (Southern Urals) in light of new U-Pb and Sm-Nd isotope data. *Zapiski RMO*, CXXX, 2, pp. 59–73. (In Russ.)
- Krasnobaev A.A., Puchkov V.N., Sergeeva N.D., Busharina S.V. (2019). The sources of zircons in clastic rocks of the Riphean deposits of the Urals. *Doklady Akademii nauk*, 488(4), pp. 413–419. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0869-56524884413-419>
- Krasnobaev, A.A., Puchkov, V.N., Kozlov, V.I., Sergeeva, N.D., Busharina, S.V., Lepekhina, E.N. (2013b). Zirconology of Navysh volcanic rocks of the Ai Suite and the problem of the age of the Lower Riphean boundary in the Southern Urals. *Dokl. Earth Sc.*, 448, pp. 185–190. <https://doi.org/10.1134/S1028334X13020050>
- Kukharensko A.A. (1961). Mineralogy of placers. Moscow: Gosgeoltekhizdat, 316 p. (In Russ.)
- Kuznetsov A. B., Bekker A., Ovchinnikova G. V., Gorokhov I. M., Vasilyeva I. M. (2017). Unradiogenic strontium and moderate-amplitude carbon isotope variations in early Tonian seawater after the assembly of Rodinia and before the Bitter Springs Excursion. *Precambrian Research*, 298, pp. 157–173. doi: 10.1016/j.precamres.2017.06.011
- Kuznetsov N.B., Romanyuk T.V., Shatsillo A.V., Orlov S.Yu., Golovanova I.V., Danukalov K.N., Ipatyeva I.S. (2012). The first results of mass U-Pb isotope dating (LA-ICP-MS) for detrital zircons from the Asha Group, South Urals: Paleogeography and paleotectonics. *Dokl. Earth Sc.*, 447, pp. 1240–1246. <https://doi.org/10.1134/S1028334X12110025>
- Lagutenkova N.S., Chepikova I.K. (1982). Upper Precambrian deposits of the Volga-Uralian area and prospects for their oil and gas potential. Moscow: Nauka, 112 p. (In Russ.)
- Larionov A.N., Andreichev V.L., Gee D.G. (2004). The Vendian alkaline igneous suite of northern Timan: ion microprobe U-Pb zircon ages of gabbros and syenite. The Neoproterozoic Timanide Orogen of Eastern Baltica. Eds. Gee D.G., Pease V. *Geol. Soc. London. Mem.*, 30, pp. 69–74. <https://doi.org/10.1144/GSL.MEM.2004.030.01.07>
- Levashova N.M., Bazhenov M.L., Meert J.G., Kuznetsov N.B., Golovanova I.V., Danukalov K.N., Fedorova N.M. (2013). Paleogeography of Baltica in the Ediacaran: Paleomagnetic and geochronological data from the clastic Zigan Formation, South Urals. *Precambrian Research*, 236, pp. 16–30. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2013.06.006>
- Ludwig K.R. (2003). User's manual for Isoplot/Ex version 3.00, a geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publications, 4, 72 p.
- Lyakhovich V.V. (1981). Methods of separation of accessory minerals. Moscow: Nedra, 86 p. (In Russ.)
- Maslov A.V., Kovalev S.G., Puchkov V.N., Sergeeva N.D. (2018). The Riphean Arsha Series of the Southern Urals: On the Geodynamic Nature of Rock Associations. *Doklady Akademii nauk*, 480(1), pp. 64–68. (In Russ.) DOI: 10.7868/S0869565218130133
- Paton Ch., Woodhead J.D., Hellstrom J.C., Herg J.M., Greig A., Maas R. (2010). Improved laser ablation U-Pb zircon geochronology through robust downhole fractionation correction. *Geochemistry: Geophysics. Geosystems*, 11(3), pp. 1–36. <https://doi.org/10.1029/2009gc002618>
- Puchkov V. N., Sergeeva N. D. (2021). Isotopic age of Riphean volcanogenic formations in the Southern Urals and the importance of event stratigraphy in refining the stratigraphic scale. *Proc. VII Russian Conference on Precambrian Geology: Upper Precambrian Stratigraphy: Problems and Solutions*, pp. 155–158. (In Russ.)
- Puchkov V.N. (2000). Paleogeodynamics of the Southern and Middle Urals. Ufa: Dauria, 146 p. (In Russ.)
- Puchkov V.N. (2010). Geology of the Urals and the Cis-Urals (Actual Issues of Stratigraphy, Tectonics, Geodynamics, and Metallogeny). Ufa: DesignPoligrafService, 280 p. (In Russ.)
- Puchkov V.N. (2016). Interrelation of plate and plume processes on a global and regional scale. Plume processes in the Urals. *Metallogeny of ancient and modern oceans*, 1, p. 17–21. (In Russ.)
- Puchkov V.N., Ernst R.E., Ivanov K.S. (2021). The importance and difficulties of identifying mantle plumes in orogenic belts: An example based on the fragmented large igneous province (LIP) record in the Ural fold belt. *Precambrian Research*, 361, 106186. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2021.106186>
- Puchkov V.N., Kozlov V.I., Sergeeva N.D., Bogdanova S.V., Söderlund U., Ernst R.E., Krasnobaev A.A., Postnikov A.V., Wingate M.T.D. (2013). The ca. 1380 Ma Mashak igneous event of the Southern Urals. *Lithos*, 174, pp. 109–124. DOI: 10.1016/j.lithos.2012.08.021
- Puchkov V.N., Krasnobaev A.A., Kozlov V.I., Matukov D.I., Nekhorosheva A.G., Lepekhina E.N., Sergeev S.A. (2007). Preliminary data on the age boundaries of the Neo- and Mesoproterozoic of the Southern Urals in light of new U-Pb datings. *Geologicheskii sbornik IG UNTs RAN*, 6, p. 3. (In Russ.)
- Puchkov, V.N., Kozlov V.I. (2005). Features of tectonics of the Volga-Ural oil and gas region. *Georesursy = Georesources*, 1(16), pp. 24–27. (In Russ.)
- Razumovsky A.A., Novikov I.A., Rudko S.V., Kuznetsov N.B., Yashunsky Yu.V. (2020). U-Pb isotope age of ash tuffs of the Late Vendian Basu formation (Asha series, Southern Urals). Moscow: GEOS. *Proc. of the 52nd tectonic meeting*, 2, pp. 219–224. (In Russ.)
- Riphean stratotype. Stratigraphy. Geochronology (1983). Moscow: Nauka, 183 p. (In Russ.)
- Ronkin Yu.L., Sindern S., Maslov A.V., Matukov D.I., Kramm U., Lepikhina O.P. (2007). The oldest (3,5 Ga) zircons of the Urals: U-Pb (SHRIMP-II) and TDM constraints. *Dokl. AN*, 415(5), pp. 651–657. (In Russ.)
- Ryantsev, A.V., Razumovsky, A.A., Novikov, I.A., Kurtukova, A.I., Kanygina, N.A., Yashunsky, Yu.V., Dubensky, A.S., Sheshukov, V.S. (2023). The Age of Volcanic Tuffs from the Basu and Zigan Formations of the Vendian (Ediacaran) Asha Group in the Southern Urals: Results of U–Th–Pb (SIMS and LA-ICP-MS) Dating of Accessory Zircon. *Dokl. Earth Sc.*, 507 (Suppl 2), S278–S286. <https://doi.org/10.1134/S1028334X22601316>
- Sergeeva N.D., Puchkov V.N. (2016). Stratigraphy of the Riphean and Vendian of the Volga-Uralian area (amendments and additions). *Proc. Interdepartmental working meeting. General stratigraphic scale and methodological problems of developing regional stratigraphic scales of Russia*, pp. 157–159. (In Russ.)

Sergeeva N.D., Puchkov V.N., Karaseva T.V. (2021). Upper Proterozoic (Riphean and Vendian) of the Volga-Ural region in parametric and deep wells. Ufa: Kniga-Print, 196 p. (In Russ.)

Sergeeva N.D., Solodova S.A. (2020). Lithological and petrographic characteristics and stratigraphic subdivision of pre-Paleozoic deposits in the section of borehole 40 Krasnousolsk (Pre-Uralian marginal trough). *Geologicheskii vestnik*, 3, pp. 55–67. (In Russ.) DOI: 10.31084/2619-0087/2020-3-4

Sergeeva, N.D., Puchkov, V.N., Krasnobaev, A.A., Kozlova, O.V., Ratov, A.A. (2019). Asha series of the Vendian: orogenic complex of the Timanides in the Southern Urals. *Geologicheskii vestnik*, 1, pp. 3–34. (In Russ.) DOI: 10.31084/2619-0087-2019-1-1

Sindern S., Ronkin Yu.L., Hetzel R., Schulte B.A., Kramm U., Maslov A.V., Lepekhina O.P., Popova O.Yu. (2006). Taratash and Aleksandrovsk metamorphic complexes (Southern Urals): T–t constraints. *Yearbook–2005*. Ekaterinburg: IGG UB RAS, pp. 322–330. (In Russ.)

Sláma J., Košler, J., Condon D. J., Crowley J. L., Gerdes A., Hanchar J. M., Horstwood M. S. A., Morris G. A., Nasdala L., Norberg N., Schaltegger U., Schoene B., Tubrett M.N., Whitehouse, M.J. (2008). Plešovice zircon—a new natural reference material for U–Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chemical geology*, 249(1–2), pp. 1–35. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.11.005>

Soboleva A.A. (2004). Volcanites and associated granitoids of the Circum-Polar Urals. Yekaterinburg: UB RAS, 146 p. (In Russ.)

Sperling E.A., Rooney A.D., Hays L., Sergeev V.N., Vorob'eva N.G., Sergeeva N.D., Selby D., Johnston D.T., Knoll A.H. (2014). Redox heterogeneity of subsurface waters in the Mesoproterozoic ocean. *Geobiology*, 12(5), pp. 373–386. <https://doi.org/10.1111/gbi.12091>

Stratigraphic Code of Russia (2019). St. Petersburg: FGBU “VSEGEI”, 96 p. (In Russ.)

Stratigraphic scheme of the Riphean and Vendian deposits of the Volga-Uralian area (2000). Explanatory note. Ufa, 81 p. (In Russ.)

Stratigraphic schemes of the Urals (Precambrian, Paleozoic) (1993). Yekaterinburg: MSC of Russia, 152 p. (In Russ.)

Tevelev A.I., Kosheleva I.A., Tevelev Ark.V., Khotylev A.O., Moseychuk V.M., Petrov V.I. (2015). New data on the isotope ages of the Taratash and Aleksandrovka metamorphic complexes. *Moscow Univ. Geol. Bull.*, 70, pp. 24–40. <https://doi.org/10.3103/S0145875215010081>

Warr L.N. (2021). IMA-CNMNC approved mineral symbols. *Mineralogical Magazine*, 85, pp. 291–320. <https://doi.org/10.1180/mgm.2021.43>

Wiedenbeck M. Allé P., Corfu F., Griffin W.L., Meier M., Oberli F., Von Quadt A., Roddick J.C., Spiegel W. (1995). Three natural zircon standards for U–Th–Pb, Lu–Hf, trace element and REE analyses. *Geostandards newsletter*, 19(1), pp. 1–23. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.1995.tb00147.x>

Yankauskas T.V. (1982). Riphean microfossils of the Southern Urals. Moscow: Nauka, *Riphean stratotype: Paleontology and paleomagnetism*, pp. 84–120. (In Russ.)

Zaitseva T.S., Gorokhov, I.M., Ivanovskaya, T.A., Semikhatov, M.A., Kuznetsov, A.B., Melnikov, N.N., Arakelyants M.M., Yakovleva, O.V. (2008). Mössbauer characteristics, mineralogy and isotopic age (Rb–Sr, K–Ar) of Upper Riphean glauconites from the UK Formation, the southern Urals. *Stratigr. Geol. Correl.*, 16, pp. 227–247. <https://doi.org/10.1134/S0869593808030015>

Zaitseva T.S., Kuznetsov A.B., Gorozhanin V.M., Gorokhov, I.N., Ivanovskaya T.A., Konstantinova G.V. (2019). The Lower Boundary of the Vendian in the Southern Urals as Evidenced by the Rb–Sr Age of Glauconites of the Bakeevo Formation. *Stratigr. Geol. Correl.*, 27, pp. 573–587. <https://doi.org/10.1134/S0869593819050083>

Zaitseva T.S., Kuznetsov A.B., Sergeeva N.D., Adamskaya E.V., Plotkina Yu.V. (2022). The U–Th–Pb Age of Detrital Zircons from Oolitic Limestones of the UK Formation: Traces of the Grenville Provenance Areas in the Late Riphean of the Southern Urals. *Dokl. Earth Sc.*, 503, pp. 143–149. <https://doi.org/10.1134/S1028334X22040195>

About the Authors

Svetlana A. Dyakova – Junior Researcher, Institute of Geology of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences

16/2, Karl Marks st., Ufa, 450077, Ufa, Russian Federation
e-mail: solodova.IG@yandex.ru

Nina D. Sergeeva – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Leading Researcher, Institute of Geology of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences

16/2, Karl Marks st., Ufa, 450077, Ufa, Russian Federation
e-mail: riphey@ufaras.ru

Anna V. Kulikova – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, Geothermochronology Research and Educational Centre of the Institute of Geology and Petroleum Technologies, Kazan Federal University

4, Kremlevskaya st., Kazan, 420111, Russian Federation
e-mail: Ak_Cool@mail.ru

Pavel A. Krasilnikov – Junior Researcher, Geothermochronology Research and Educational Centre of the Institute of Geology and Petroleum Technologies, Kazan Federal University

4, Kremlevskaya st., Kazan, 420111, Russian Federation
e-mail: krasilnikovp290@gmail.com

Milana R. Lukmanova – Laboratory assistant – Researcher, Institute of Geology of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences; Student, Ufa University of Science and Technology

16/2, Karl Marks st., Ufa, 450077, Ufa, Russian Federation
e-mail: riphey@ufaras.ru

Timur R. Abdeev – Laboratory assistant – Researcher, Institute of Geology of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences; Student, Ufa University of Science and Technology

16/2, Karl Marks st., Ufa, 450077, Ufa, Russian Federation
e-mail: riphey@ufaras.ru

Manuscript received 16 November 2024;

Accepted 29 April 2025;

Published 20 September 2025

© 2025 The Authors. This article is published in open access under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)