

УДК 550.93:552.5

## U–Th–Pb-ВОЗРАСТ ДЕТРИТОВОГО ЦИРКОНА ИЗ ООЛИТОВЫХ ИЗВЕСТНЯКОВ УКСКОЙ СВИТЫ: СЛЕДЫ ГРЕНВИЛЬСКИХ ИСТОЧНИКОВ СНОСА В ПОЗДНЕМ РИФЕЕ ЮЖНОГО УРАЛА

© 2022 г. Т. С. Зайцева<sup>1,\*</sup>, член-корреспондент РАН А. Б. Кузнецов<sup>1</sup>, Н. Д. Сергеева<sup>2</sup>, Е. В. Адамская<sup>1</sup>, Ю. В. Плоткина<sup>1</sup>

Поступило 20.11.2021 г.

После доработки 06.12.2021 г.

Принято к публикации 08.12.2021 г.

Приведены результаты U–Th–Pb LA–ICP–MS-датирования обломочного циркона из оолитовых известняков нижней подсвиты укской свиты, слагающей верхний горизонт стратотипа верхнего рифея на Южном Урале. Полученные данные показывают, что половину зерен обломочного циркона поставляли архейские и раннепротерозойские комплексы, размываемые на прилегавшей территории Восточно-Европейской платформы. Магматические комплексы (бердяшский, рябиновский, губенский и ахмеровский) с возрастом 1.35–1.40 млрд лет, известные сегодня в пределах Башкирского мегантиклинория, могли поставлять менее десятой доли зерен. Однако преобладающим (около половины зерен) источником сноса обломочного циркона в раннеукское время были породы мезопротерозойского (среднерифейского) возраста (1.13–1.56 млрд лет). Потенциальными мезопротерозойскими источниками могли являться либо породы гренвильского Свеко-Норвежского орогена (1.13–1.16 млрд лет) и граниты-рапакиви Фенноскандии (1.44–1.56 млрд лет), либо неизвестный континентальный блок, приключенный в ходе гренвильской орогении.

*Ключевые слова:* U–Pb-возраст, детритовый циркон, источники сноса, укская свита, верхний рифей, Южный Урал

DOI: 10.31857/S2686739722040193

Обломочный циркон присутствует в терригенных отложениях на всех стратиграфических уровнях типового разреза верхнего докембрия Южного Урала и традиционно привлекался для поиска источников и определения возраста размываемых пород [1, 2]. Морфологическое разнообразие циркона показало, что в области размыва преобладали породы кислого состава и метаморфические комплексы, преимущественно местные – в пределах Башкирского мегантиклинория (БМА) Южного Урала и прилегавшей Волго-Уральской области [2]. Развитие изотопно-геохронологических методов позволило определять возраст отдельных зерен циркона, что значительно расширило возможности по идентификации питающих провинций. Среди таких провинций уверенно выделялись супракрустальные породы Тараташского массива Южного Урала и фундамента Во-

сточно-Европейской платформы (см. обзор [2–6]). Этот вывод был справедлив для отложений раннего и среднего рифея Южного Урала. Однако наиболее спорным оказался интервал позднего рифея и венда (неопротерозоя), охватывающий около полумиллиарда лет.

Первые данные о возрасте обломочного циркона из песчаников каратауской серии позднего рифея и ашинской серии венда Южного Урала показали наличие трех разновозрастных питающих провинций: архей-раннепротерозойского фундамента Восточно-Европейской платформы (2.1–2.6 млрд лет), ранне-среднерифейских (мезопротерозойских) гранитоидов (1.4–1.7 млрд лет) и неизвестных “грэнвильских” комплексов (1.07–1.3 млрд лет) [1]. Однако эти данные были получены при анализе больших усредненных навесок циркона альфа-свинцовым методом, что могло привести к значительным ошибкам в определении возраста. Позднее возраст единичных зерен обломочного циркона из песчаников верхнего рифея и венда был определен методами ID–TIMS [7] и LA–ICP–MS [3–5]. Эти фрагментарные исследования показали, что в средней части зильмердакской свиты позднего рифея преобла-

<sup>1</sup>Институт геологии и геохронологии докембрия Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Институт геологии, Уфимский научный центр Российской академии наук, Уфа, Россия

\*E-mail: z-t-s@mail.ru

дает обломочный материал только из архей-раннепротерозойских комплексов платформы (древнее 1.74–1.82 млрд лет), а более молодые (1.19–1.50 млрд лет) зерна из гренвилльских (Свеко-Норвежских) комплексов появляются только в ашинской серии венда [3–5]. В качестве области сноса гренвилльского циркона предполагалась не уральская окраина Восточно-Европейской платформы (континент Балтика), а удаленный континент – квинслендская окраина Австралии [5]. Однако последующее расширение исследований показало, что устойчивая популяция обломочных зерен циркона с возрастом 1.14–1.37 млрд лет присутствует уже в базальных горизонтах каратауской серии – бирьянской подсвите зильмердакской свиты [8].

Сегодня возраст обломочного циркона верхнего докембрия Южного Урала определен лишь в основании разреза верхнего рифея и в середине разреза венда. Эти два стратиграфических уровня разделены интервалом более 350–400 млн лет, что значительно затрудняет палеогеографические и геодинамические реконструкции уральского палеобассейна в позднем докембрии. Наша работа представляет новые данные о U–Th–Pb-возрасте обломочного циркона из оолитового известняка укской свиты – верхнего горизонта каратауской серии рифея.

Каратауская серия верхнего рифея на западном крыле Башкирского мегантиклинория (БМА) расчленяется на зильмердакскую, катавскую, инзерскую, миньярскую и укскую свиты (рис. 1). Укская свита (от 180 до 400 м) имеет двухчленное строение [1]: нижняя подсвита сложена глауконит-кварцевыми, кварцевыми и полимиктовыми песчаниками и алевролитами с прослоями аргиллитов, а верхняя – преимущественно известняками, включающими строматолитовые разности. Оолитовые (микрофитолитовые) известняки слагают маломощную (5 м) пачку в средней части нижней подсвиты. Этот маркирующий горизонт содержит микрофитолиты IV верхнерифейского комплекса [1]. Терригенные отложения укской свиты на подстилающих доломитах миньярской свиты залегают согласно [1] и лишь в некоторых разрезах с небольшим перерывом [9]. На западном крыле Башкирского мегантиклинория на известняках укской свиты со значительным перерывом залегают отложения бакеевской или урюкской свит ашинской серии венда.

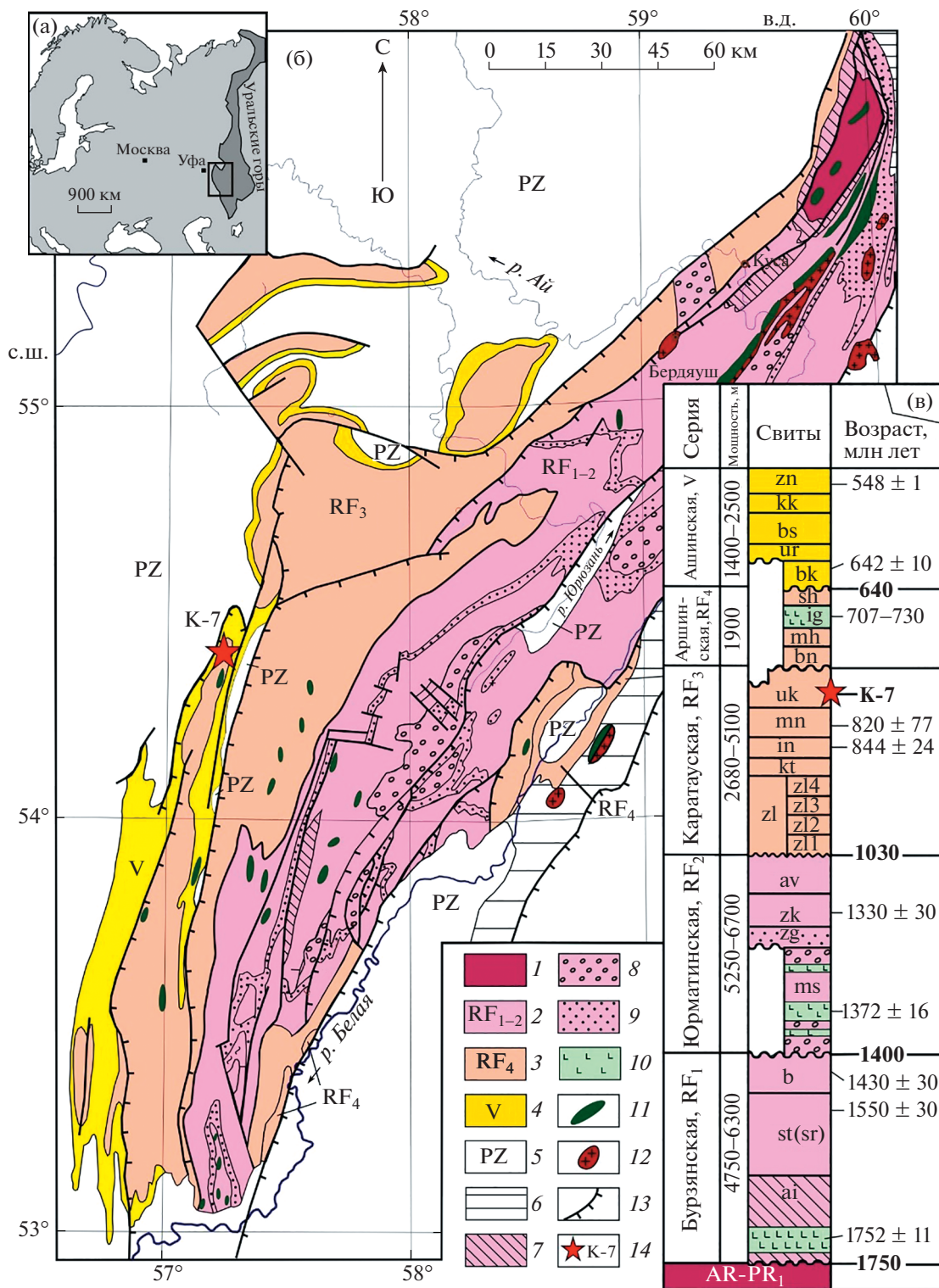
Pb–Pb-возраст подстилающих доломитов миньярской свиты составляет  $780 \pm 80$  [10] и  $820 \pm \pm 77$  млн лет [11], а Rb–Sr-возраст глауконитов из перекрывающих песчаников бакеевской свиты –  $642 \pm 9$  млн лет [12]. Rb–Sr-возраст Al-глауконита из нижней подсвиты укской свиты лежит в интервале 660–690 млн лет [13]. Однако другие данные указывают на более древний возраст укской сви-

ты: Sr-хемостратиграфические данные, предполагающие возраст укских известняков около 800 млн лет [14], а также отмеченные в породах укской свиты особые седиментологические текстуры “molar tooth”, которые исчезают из геологической летописи примерно 730–750 млн лет назад [15]. Еще одним косвенным свидетельством является U–Pb-возраст ( $707 \pm 2$  и  $732 \pm 2$  млн лет, SHRIMP [16]) игонинских вулканитов аршинской серии, отложения которой на восточном крыле БМА в Тирлянской синклинали перекрывают миньярские доломиты. Таким образом, отложения укской свиты могут быть сопоставлены с возрастным интервалом 730–800 млн лет.

С целью определения источников детритового циркона в отложениях укской свиты был отобран образец (обр. К-7) оолитового известняка из средней части нижней подсвиты в разрезе вблизи хутора Кулмас на р. Басу ( $54^{\circ}19'6.740''$  с.ш.;  $57^{\circ}10'11.093''$  в.д.) на западном крыле Алатауского антиклинория БМА. Пачка оолитовых известняков содержит примесь обломочного кварца (около 20%) и редкие зерна полевых шпатов и акцессорных минералов (циркон, апатит, турмалин, рутил, гематит и др.).

Выделение циркона проводилось по стандартной методике с использованием тяжелых жидкостей. Циркон представлен зернами длинно- и короткопризматического габитуса, а также хорошо окатанными округлыми зернами. Кристаллы имеют бледно-розовую окраску. Размер зерен варьирует от 50 до 300 мкм. Катодолюминесцентное исследование циркона на сканирующем электронном микроскопе “TESCAN” VEGA 3 показало, что большинство зерен имеет тонкую осцилляторную зональность и хорошо проявленную секториальность, однако часть зерен не имеет видимой зональности (рис. 2).

U–Th–Pb LA–ICP–MS-геохронологическое исследование зерен циркона выполнено в ИГГД РАН на ICP масс-спектрометре ELEMENT XR, оснащенный системой лазерной абляции NWR-213 с камерой TwoVolumeTwo по методике, описанной в [17]. Диаметр пучка лазера 25 мкм, длительность измерения 100 с (40 с холостой по газу, 60 с абляция). Калибровка изотопных измерений была проведена по стандарту GJ-1. Для контроля качества данных использованы стандартный циркон Harvard 91500 и Plešovice. Для них в ходе измерений получены конкордантные оценки возраста  $1064 \pm 6$  и  $339 \pm 4$  млн лет ( $\pm 1\sigma$ ,  $n = 7$ ), которые хорошо совпадают с оценками возраста, полученными методом ID-TIMS. Изотопные отношения рассчитаны в программе GLITTER©, а поправки на обычный Pb – в программе ComPb-Corr. Конкордантные возрасты рассчитаны с использованием программы Isoplot v.4.15. При построении гистограммы распределения возраста и



**Рис. 1.** Географическое положение места отбора образцов (а), схематическая геологическая карта (б) и сводная стратиграфическая колонка (в) рифея и венда Башкирского мегантиклинория [6] с дополнениями и изменениями. Условные обозначения к карте (б): 1 – архей-палеопротерозой (Тараташский метаморфический комплекс), 2 – нижний и средний рифей, 3 – верхний и завершающий рифей, 4 – венд, 5 – палеозой, 6 – Уралтауский и Уфалейский метаморфические комплексы; породы: 7 – вулканогенно-осадочные; 8 – вулканогенные, 9 – трахибазальты, 11 – габбро, 12 – граниты; 13 – тектонические надвиги; 14 – местоположение пробы. Возраст рубежей и свит (млн лет): рифей – см. [20]; аршиний – [16]; венд – [12].

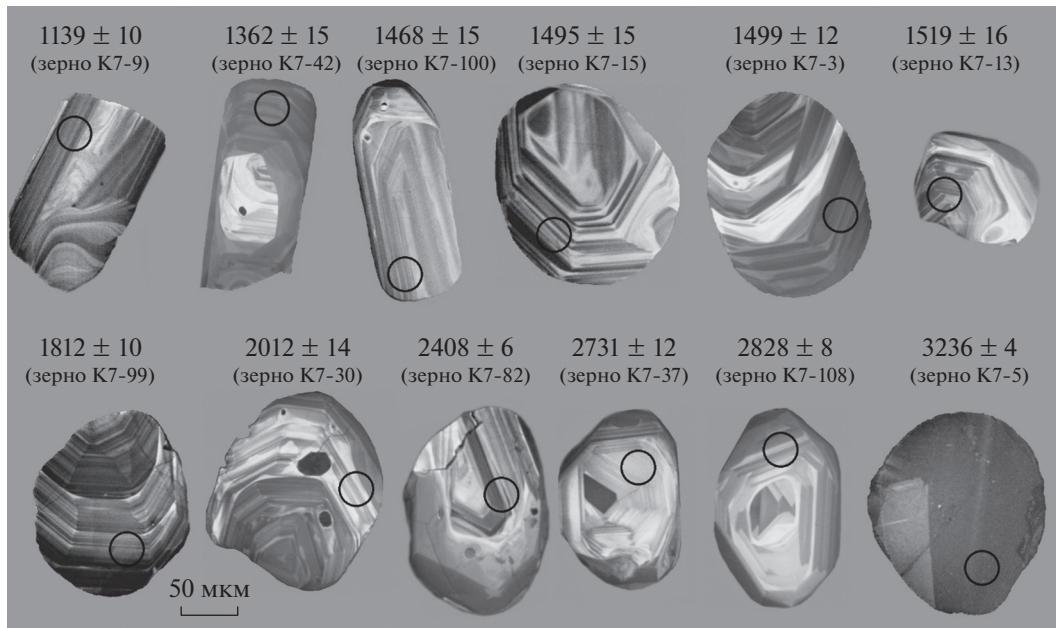


Рис. 2. Микрофотографии кристаллов циркона из оолитовых известняков укской свиты (образец К-7), выполненные в режиме катодолюминесценции. Кружками обозначены точки, где проводились U–Th–Pb-измерения.

кривой относительной вероятности возраста во внимание принимали только конкордантные оценки возраста.

В образце К-7 проанализировано 128 зерен циркона и получено 96 конкордантных оценок возраста, которые находятся в широком интервале от  $1129 \pm 15$  до  $3236 \pm 4$  млн лет (табл. 1). На кривой относительной вероятности выделяется несколько пиков: около 1.14 ( $n = 5$ ), 1.37 ( $n = 4$ ), 1.50 ( $n = 35$ ), 1.78 ( $n = 3$ ), 1.83 ( $n = 3$ ), 1.88 ( $n = 3$ ), 1.92 ( $n = 5$ ), 2.01 ( $n = 4$ ), 2.41 ( $n = 7$ ), 2.70 ( $n = 7$ ) и 2.74 ( $n = 7$ ) млрд лет (рис. 3). Отдельные зерна имеют конкордантные возрасты 1621, 1737, 2289, 2874 и 3240 млн лет.

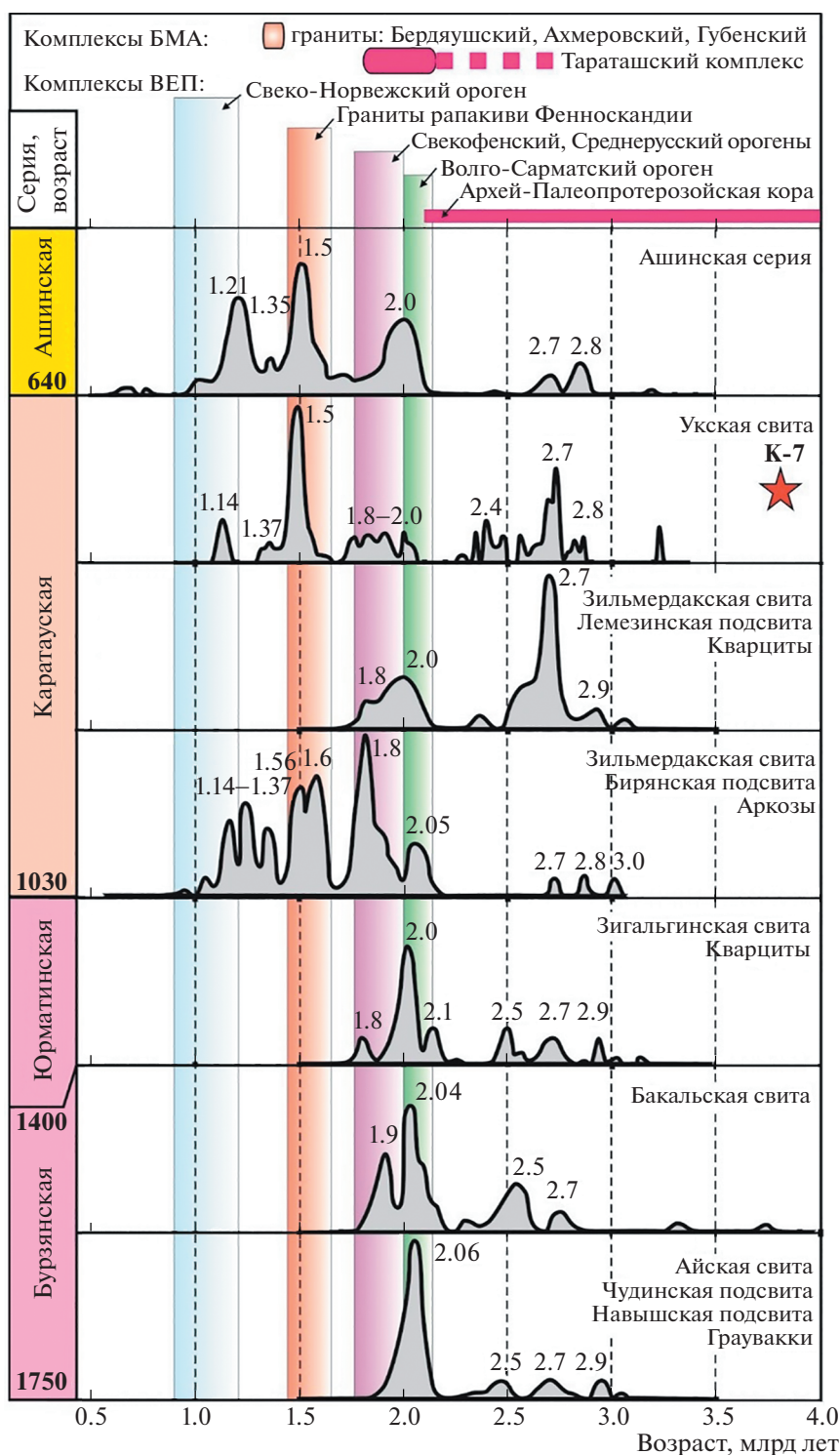
Полученные данные свидетельствуют о том, что источниками сноса детритового циркона для нижней подсвиты укской свиты являлись породы преимущественно мезопротерозойского (среднерифейского), палеопротерозойского и архейского возраста. В целом распределение возраста детритовых зерен циркона в укской свите близко к таковому в бирьянской подсвите основания верхнего рифея и ашинской серии венда (рис. 3).

Наиболее вероятным источником архейского и раннепротерозойского циркона являются кристаллические и метаморфические комплексы Тараташского массива, представляющего выступ фундамента Восточно-Европейской платформы (рис. 3). Эти “древние” (1.8–2.7 млрд лет) популяции обломочного циркона являются единственными в терригенных отложениях раннего и среднего рифея, а также в лемезинской подсвите

зильмердакской свиты позднего рифея Южного Урала [3, 4]. Среди изученных зерен циркона укской свиты лишь одна десятая часть имеет возраст 1.37 млн лет, что указывает на присутствие в области размыва гранитоидов Бердяшского, Губенского, Рябиновского и Ахмеровского массивов, а также среднерифейских машакских риолит-базальтовых вулканитов Южного Урала [6]. Однако источники, поставлявшие в уральский палеобассейн циркон с возрастом 1.13–1.62 млрд лет, пока неизвестны.

В середине позднего рифея (неопротерозоя) уральский палеобассейн представлял собой шельфовую окраину континента Балтика, который в свою очередь объединял три крупных мегаблока – Волго-Уралья, Сарматия и Фенноскандия [18]. Кристаллические породы, слагающие названные мегаблоки и обрамляющие их коллизионные структуры, разделяются на три разновозрастных комплекса: Волго-Уральский-Сарматский (2100–3300 млн лет), Свекофенский (1750–2100 млн лет) и Свеко-Норвежский (900–1750 млн лет) [5, 18].

Анализ полученных данных показывает, что циркон из Волго-Уральских и Свекофенских комплексов составляет половину от изученных зерен из укской свиты (табл. 1). Породы этих комплексов известны в фундаменте Восточно-Европейской платформы и в Тараташском массиве, примыкавших к уральскому палеобассейну как в доукское, так и в укское время. Наиболее любопытным результатом представляется то, что



**Рис. 3.** Сравнение графиков плотности вероятности распределения U–Th–Pb-возрастов детритового циркона ( $dZr$ ) из уксской свиты (обр. К-7) и  $dZr$  из рифейских отложений Южного Урала: навышской и чудинской подсвит айской свиты, бакальской и зигальгинской свит [4], бирьянской [8] и лемезинской подсвиты зильмердаксской свиты [3], а также ашинской серии венда [5]. В верхней части рисунка – возраст потенциальных источников  $dZr$ , поступавших в уральский палеобассейн при разрушении кристаллических комплексов Восточно-Европейской платформы (ВЕП) и Башкирского мегантиклинория (БМА).

другую половину изученных зерен представляет циркон из более молодых Свело-Норвежских комплексов. Следует отметить, что устойчивое

доминирование этого источника наблюдается как в начале позднего рифея, так и в середине венда (рис. 3). В бирьянское время доля обломоч-

**Таблица 1.** Результаты U–Th–Pb-датирования детритового циркона укской свиты (обр. К-7)

| Характеристики популяций детритового циркона (возраст, млн лет) |   |                            |                                      | Кристаллические комплексы потенциальных областей сноса |
|---|---|----------------------------|--------------------------------------|--|
| Пик максимальной вероятности*                                   | Возрастной интервал популяций и единичных зерен | Количество зерен, <i>n</i> | Суммарное количество зерен в выборке | Возраст, млн лет                                       |
| 1141  | 1129–1158                                       | 5                          | 46                                   | Свеко-Норвежский (900–1750)                            |
| 1366  | 1330–1399                                       | 4                          |                                      |  |
| 1497  | 1435–1561                                       | 35                         |                                      |  |
| –   | (1621, 1737)**                                  | 2                          |                                      |  |
| 1775  | 1757–1786                                       | 3                          | 18                                   | Свекофенский (1750–2100)                               |
| 1832, 1884  | 1812–1886                                       | 6                          |                                      |  |
| 1921  | 1902–1961                                       | 5                          |                                      |  |
| 2012  | 2011–2050                                       | 4                          |                                      |  |
| –   | (2289, 2356)**                                  | 2                          | 32                                   | Волго-Уральский (2100–3300)                            |
| 2409  | 2408–2427                                       | 3                          |                                      |  |
| –   | (2451–2671)**                                   | 8                          |                                      |  |
| 2703, 2741  | 2696–2745                                       | 14                         |                                      |  |
| 2828  | 2804–2850                                       | 3                          |                                      |  |
| –   | (2874, 3236)**                                  | 2                          |                                      |  |

Примечание: \* максимум вероятности возраста ( $2\sigma$ ) на кривой относительной вероятности; \*\* единичные зерна, не образующие популяций.

ных зерен циркона из Свеко-Норвежских комплексов возрастает [8], а в середине ашинского времени только продолжает увеличиваться [5].

В пределах Балтики такие комплексы широко развиты в Фенноскандии – это огромные поля гранитов-рапакиви готского возраста (1.47–1.62 млрд лет [19]) и гринвильские магматические комплексы Свеко-Норвегии (0.95–1.22 млрд лет [18, 19]). Массивы гранитов-рапакиви удалены от уральского палеобассейна на 1800–2300 км, а гринвильские комплексы – более 2500 км. Значительная удаленность Свеко-Норвежских комплексов Балтики породила сомнения при рассмотрении их в качестве потенциальных поставщиков обломочного материала для терригенных отложений уральского палеобассейна. В качестве альтернативного поставщика были предложены гипотетический “небалтийский” источник и квинслендская окраина Австралии [5]. Этот вывод развивал ранние предположения о “восточном” источнике алюмосиликокластики, поступавшей в венде и позднем рифее из-за пределов Восточно-Европейской платформы [7–9].

Таким образом, среди обломочного циркона укской свиты лишь половина исследованных зерен представляет продукты размыва пород приуральских областей и местные (уральские) перетолженные (рециклированные) источники [6].

Новые данные о U–Th–Pb LA–ICP–MS-возрасте обломочного циркона из укской свиты, вместе с опубликованными ранее данными, фиксируют устойчивый мезопротерозойский (среднерифейский) сигнал в терригенных отложениях позднего докембрия (неопротерозоя) Южного Урала – в бирьянское, укское и ашинское время. Этот интервал охватывает практически весь неопротерозой (поздний рифей и венд). Потенциальным мезопротерозойским источником обломочного циркона в пределах древнего континента Балтика в неопротерозое могли быть либо граниты-рапакиви Фенноскандии и породы гринвильского Свеко-Норвежского орогена, либо неизвестный континентальный блок, причлененный к Балтике в ходе гринвильской орогении.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№ 19-05-00886) и тем НИР ИГГД РАН (№ FMUW-2021-0003) и ИГ УФИЦ РАН (№ FMRS-2022-0013), при использовании оборудования ЦКП АИРИЗ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козлов В.И. Верхний рифей и венд Южного Урала. М. Наука, 1982. 128 с.

2. *Сергеева Н.Д.* Акцессорные минералы терригенных пород стратотипических разрезов рифея на Южном Урале // Верхний докембрий Южного Урала и востока Русской плиты Уфа БНЦ УрО АН СССР, 1988. С. 46–53.
3. *Романюк Т.В., Маслов А.В., Кузнецов Н.Б., Белоусова Е.А., Ронкин Ю.Л., Крупенин М.Т., Горожанин В.М., Горожанина Е.Н., Серегина Е.С.* // ДАН. 2013. Т. 452. № 6. С. 642–645.
4. *Романюк Т.В., Кузнецов Н.Б., Сергеева Н.Д., Паверман В.И., Горожанин В.М., Горожанина Е.Н.* // ДАН. 2020. Т. 493. № 2. С. 29–35.
5. *Kuznetsov N.B., Meert J.G., Romanuyuk T.V.* // Precambrian Research. 2014. V. 244. P. 288–305.
6. *Краснобаев А.А., Пучков В.Н., Сергеева Н.Д., Бушарина С.В.* // Георесурсы. 2019. Т. 21. № 1. С. 15–25.
7. *Willner A.P., Sindern S., Metzger R., Ermolaeva T., Kramm U., Puchkov V., Kronz A.* // Precambrian Research. 2003. V. 124. P. 1–20.
8. *Маслов А.В., Ерохин Ю.В., Гердес А., Ронкин Ю.Л., Иванов К.С.* // ДАН. 2018. Т. 482. № 5. С. 558–561.
9. *Беккер Ю.П.* Молассы докембрия. Л.: Наука, 1988. 288 с.
10. *Овчинникова Г.В., Васильева И.М., Семихатов М.А., Горохов И.М., Кузнецов А.Б., Гороховский Б.М., Левский Л.К.* // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2000. Т. 8. № 6. С. 3–19.
11. *Kuznetsov A.B., Bekker A., Ovchinnikova G.V., Gorokhov I.M., Vasilyeva I.M.* // Precambrian Research. 2017. V. 298. P. 157–173.
12. *Зайцева Т.С., Кузнецов А.Б., Горожанин В.М., Горохов И.М., Ивановская Т.А., Константинова Г.В.* // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2019. Т. 27. № 5. С. 82–96.
13. *Зайцева Т.С., Горохов И.М., Ивановская Т.А. и др.* // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2008. Т. 14. № 3. С. 3–24.
14. *Кузнецов А.Б., Семихатов М.А., Горохов И.М.* // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2018. Т. 26. № 4. С. 3–23.
15. *Маслов А.В., Гражданкин Д.В., Дуб С.А., Мельник Д.С., Парфенов Т.М., Колесников А.В., Чердниченко Н.В., Киселева Д.В.* // Литосфера. 2019. Т. 19. № 5. С. 659–686.
16. *Краснобаев А.А., Козлов В.И., Пучков В.Н., Сергеева Н.Д., Бушарина С.В.* // Литосфера. 2012. № 4. С. 127–140.
17. *Ковач В.П., Котов А.Б., Гладкоуб Д.П., Толмачева Е.В., Великославинский С.Д., Гороховский Б.М., Подковыров В.Н., Загорная Н.Ю., Плоткина Ю.В.* // ДАН. 2018. Т. 482. № 2. С. 1138–1141.
18. *Bogdanov S.V., Bingen B., Gorbatshev R., Kheraskova T.N., Kozlov V.I., Puchkov V.N., Volozh Yu.A.* // Precambrian Res. 2008. V. 160. № 1/2. P. 23–45.
19. *Ларин А.М.* Граниты рапакиви и ассоциирующие породы. СПб: Наука, 2011. 402 с.
20. *Семихатов М.А., Кузнецов А.Б., Чумаков Н.М.* // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2015. Т. 23. № 6. С. 16–27.

## U–Th–Pb AGE OF DETRITAL ZIRCONS FROM OOLITIC LIMESTONES OF THE UK FORMATION: TRACES OF GRENVILLE PROVENANCE IN THE LATE RIPHEAN OF THE SOUTHERN URALS

**T. S. Zaitseva<sup>a, #</sup>, corresponding Member of the RAS A. B. Kuznetsov<sup>a</sup>, N. D. Sergeeva<sup>b</sup>, E. V. Adamskaya<sup>a</sup>, and Yu. V. Plotkina<sup>a</sup>**

<sup>a</sup>*Institute of Precambrian Geology and Geochronology, Russian Academy of Sciences, St.-Petersburg, Russian Federation*

<sup>b</sup>*Institute of Geology, Ufimsky research Center, Russian Academy of Sciences, Ufa, Russian Federation*

<sup>#</sup>*E-mail: z-t-s@mail.ru*

The results of U–Th–Pb LA–ICP–MS dating of detrital zircons from oolitic limestones of the lower subformation of the Uk Formation are presented. The Uk Formation represents the upper level of the Late Riphean stratotype in the South Urals. The obtained data show that half of the detrital zircons were supplied by Archean and Paleoproterozoic complexes eroded in the adjacent territory of the East European Platform. Igneous complexes (Berdyush, Ryabinovsky, Gubensky and Akhmerovsky granitoids) with an age of 1.35–1.40 Ga located into the Bashkirian meganticlinorium could supply less than a tenth of grains. Nevertheless, the Mesoproterozoic (Middle Riphean) rocks (1.13–1.62 Ga) were the main source of detrital zircons in the Early Uk time. A potential Mesoproterozoic source could be either the rapakivi granites of Fennoscandia and the Sveconorwegian rocks, or an unknown continental block joined during the Grenville orogeny.

**Keywords:** U–Pb age, detrital zircons, provenance, Uk Formation, Upper Riphean, South Urals