

УДК 550.42, 551.24

СВИДЕТЕЛЬСТВА РАННЕДОКЕМБРИЙСКОГО ВОЗРАСТА МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ПОРОД УФАЛЕЙСКОГО БЛОКА (СРЕДНИЙ УРАЛ): РЕЗУЛЬТАТЫ U–Th–Pb (LA-ICP-MS) ИССЛЕДОВАНИЙ ВОЗРАСТА ДЕТРИТОВОГО ЦИРКОНА ИЗ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

© 2025 г. Г. Ю. Шардакова^{1,*}, Е. В. Пушкарев¹, член-корреспондент РАН А. Б. Котов²,
А. О. Симанкова¹

Поступило 21.08.2024 г.

После доработки 29.08.2024 г.

Принято к публикации 02.09.2024 г.

Выполнены U–Th–Pb (LA-ICP-MS)-геохронологические исследования детритового циркона из четвертичных отложений западной части Уфалейского блока на Среднем Урале, в тектоническом фрагменте, сложенном амфиболит-гнейсовой толщей, среди которой присутствуют тела докембрийских кинопироксенитов. Ярко выраженный статистический максимум датировок соответствует интервалу 2100–2000 млн лет. Несколько максимумов меньшей интенсивности отвечают диапазону 3200–2500 млн лет. Это даёт все основания полагать, что в пределах Уфалейского блока присутствуют породы раннедокембрийского возраста, которые ранее здесь не были выявлены.

Ключевые слова: детритовый циркон, U–Th–Pb-изотопные исследования, четвертичные отложения, возраст субстрата, источники сноса, Уфалейский блок, Урал

DOI: 10.31857/S2686739725010015 EDN: GXPXPK

Современный облик Уральского орогена сформировался в результате сменяющихся во времени геодинамических режимов, от деструкции древней платформы, через развитие океанического бассейна, до субдукции и последующих коллизионных и постколлизионных событий. В результате проявления этих процессов в области сочленения Уральского орогена с Восточно-Европейской платформой (ВЕП) образовалась зона аккреции состоящая из блоков разного возраста и происхождения [1]. В частности, среди них присутствуют блоки, в строении которых участвуют породы раннедокембрийского возраста. На Южном Урале это Тараташский и Александровский блоки (образования, слагающие эти блоки, в литературе часто описывают как одноимённые комплексы), которые считаются фрагментами

ВЕП, интегрированными в структуру Уральского орогена ([2, 3, 4] и др.). Эти блоки сложены преимущественно гранулитами, гнейсами и амфиболитами, в которых присутствует циркон с U–Th–Pb-возрастом 2800–2500 млн лет, а модельный Nd-возраст пород достигает 3.5 млрд лет [4, 5]. Структурно-метаморфические преобразования пород указанных блоков, происходили в интервалах 2460–1800, 1350–1200 млн лет и далее вплоть до 300 млн лет [3–5].

В постколлизионной структуре Палеоуральского герцинского орогена на одной широте с Тараташским и Александровским блоками, но несколько восточнее, расположен Уфалейский блок (УБ), который является южной частью одноимённого антиклинория. С севера УБ ограничен Куказарским разломом, отделяющим его от северной части Уфалейского антиклинория, с востока – зоной Главного Уральского разлома (ГУР), с запада – Уфимским разломом.

Восточная часть УБ, примыкающая к ГУР, сложена сланцами, амфиболитами, кварцитами и эклогитоподобными породами куртинской свиты, а западная и центральная части – амфиболитами

¹ Институт геологии и геохимии Уральского отделения
Российской Академии наук, Екатеринбург, Россия

² Институт геологии и геохронологии докембрия Российской
Академии наук, Санкт-Петербург, Россия

* E-mail: shardakovagalina@mail.ru

и гнейсами егустинской и слюдяногорской свит (рис. 1). Возраст метаморфизма двух последних свит оценивается в интервале 550–480 млн лет, [6–8], хотя на геологической карте они отнесены к протерозою, куртинская — к среднему рифею [9]. Надёжных геохронологических данных, подтверждающих докембрийский возраст пород УБ и единого мнения об их природе до сих пор не существует [1, 6–8].

На западе УБ, по правобережью реки Уфа, во фрагменте, ограниченном со всех сторон

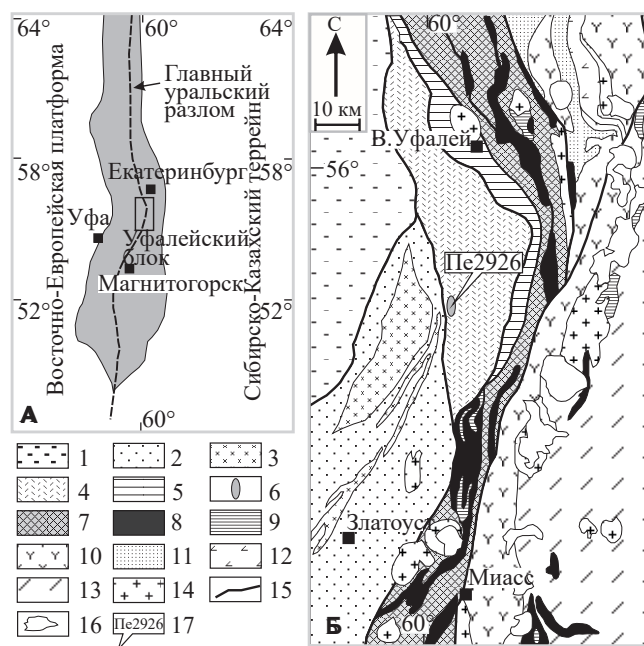


Рис. 1. Геотектоническая позиция (А) и упрощённая схема геологического строения (Б) Уфалейского блока [1, 2]. 1 – палеозойские комплексы осадочного чехла Восточно-Европейской платформы; 2 – протерозойские осадочные комплексы, 3 – Тараташский и Александровский блоки (AR-PR), 4–5 – Уфалейский блок: 4 – амфиболиты и гнейсы егустинской и слюдяногорской свит, нерасчленённые; 5 – куртинская эклогит-сланцевая свита; 6 – пироксениты Шигирских сопок; 7–9 – зона Главного Уральского разлома с фрагментами комплексов Магнитогорской и Тагильской островных дуг (7), серпентинизированных офиолитов (8) и габброидов (9); 10–12 – комплексы Сысертско-Ильменогорского антиклинория: 10 – метаморфические и щелочные породы, 11 – метаосадочные породы, 12 – метавулканогенные породы; 13 – средне-верхнепалеозойские осадочно-вулканогенные породы с телами ультрабазитов (также знак (8)); 14 – диориты и гранодиориты; 15 – тектонические нарушения; 16 – озёра; 17 – номер и положение пробы на детритовый циркон

разрывными нарушениями, среди гнейсов и амфиболитов егустинской свиты залегает субмеридиональное тело (4×0.5 км) ортопироксен-плагиоклаз-оливиновых клинопироксенитов, выраженное в рельефе северной и южной Шигирскими сопками (ШС), разделёнными субширотной долиной временного водотока. Геологические взаимоотношения пироксенитов с окружающими породами не установлены. Пироксениты обладают петрогеохимическим сходством с одноимёнными породами из дунит-клинопироксенит-габбровых комплексов Урало-Аляскинского типа. Предполагается, что исходный для них расплав имел анкармитовые характеристики — высокую величину отношения $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3 > 1$, свидетельствующую о верлитовом составе мантийного источника [10]. По данным А.А. Краснобаева с соавторами, U–Pb-возраст наиболее древних цирконов из пироксенитов ШС соответствует 1651 ± 47 и 1444 ± 46 млн лет [11], на основании чего принят палеопротерозойский возраст пород, зафиксированный на геологической карте [9]. Однако в этих работах не обсуждается вероятность того, что древние цирконы могли быть захвачены при внедрении пироксенитов ШС. Показательно, что в сходных по составу породах Александровского блока [12] был определён более древний U–Pb-возраст циркона 2022 ± 15 млн лет и предполагается архейский возраст протолита [5, 13]. Даже если допустить ксеногенную природу циркона в пироксенитах ШС, то можно предположить присутствие в их обрамлении раннедокембрийских метаморфических пород, которые ранее установлены не были.

Для проверки этого предположения выполнено определение U–Th–Pb (LA-ICP-MS)-возраста детритового циркона из четвертичных глинисто-гравийных отложений сухого русла временного водотока в субширотной долине длиной около 1 км, разделяющей пироксениты Северной и Южной Шигирских сопок. Область сноса водотока захватывает как сами ультраосновные породы, так и непосредственно вмещающие их гнейсы и амфиболиты егустинской свиты. Привнос материала из удалённых источников не исключен, но маловероятен.

Исследования проводились в ЦКП “Геоаналитик”, ИГГ УрО РАН, г. Екатеринбург. Морфология и внутреннее строение циркона изучались с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN MIRA в режимах обратно-рассеянных электронов и катодolumинесценции. U–Th–Pb-изотопные исследования выполнены на квадрупольном масс-спектрометре ICP-MS NexION 300S с приставкой для

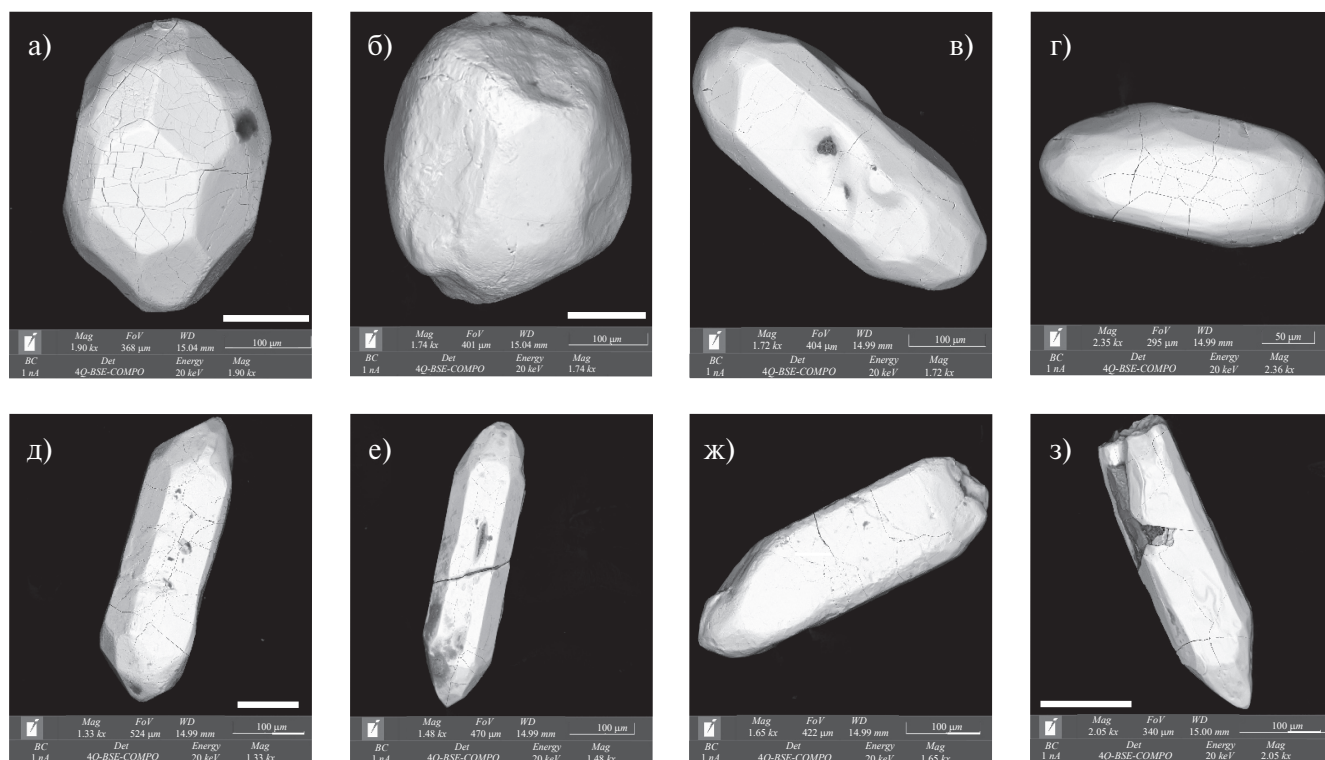


Рис. 2. Морфология зёрен детритового циркона из четвертичных гравийно-глинистых отложений в обрамлении пироксенитов Шигирских сопок. Сканирующий электронный микроскоп Mira Tescan, режим обратно-рассеянных электронов

лазерной абляции (LA-ICP-MS) NWR 213. Диаметр “кратера” 25 мкм, частота повторения импульсов 10 Гц, плотность энергии 10–11 Дж/см². Калибровка производилась по стандартному циркону GJ-1 [14]. Для контроля качества аналитических данных использованы стандартные кристаллы циркона 91500, Plešovice. В ходе исследований получены средневзвешенные оценки возраста по отношению $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ – $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$: для стандарта 91500 – 1065 ± 5.8 млн лет (1σ , $n = 8$, СКВО = 0.00079, вероятность = 0.98) для стандарта Plešovice – 337.9 ± 1.6 млн лет (1σ , $n = 9$, СКВО = 0.078, вероятность = 0.38). Полученные для стандартов циркона значения возраста согласуются с рекомендованными данными [15]. U–Th–Pb-изотопные отношения рассчитаны в программе GLITTER 4.0 GEMOC [16]. Поправки на обычный свинец введены с помощью программы ComPb [17]. Расчёт конкордантных возрастов (Concordia Ages) выполнен в программе IsoplotR. При построении гистограмм, кривых относительной вероятности распределения возрастов и расчёте максимумов возрастов (Peak Ages) [18] приняты во внимание только конкордантные оценки возраста ($-5 < D < 5$) (Аналитики В.С. Червяковский, М.В. Червяковская). Результаты изотопных

исследований представлены в дополнительных материалах к статье (Suppl. Табл. 1).

Детритовый циркон представлен преимущественно крупными (600–200 мкм) слабо окатанными зёрнами и неокатанными кристаллами, коротко- и длиннопризматического габитуса ($K_{уд} = 0.5$ –2 и 3–5 соответственно) (рис. 2). Резко преобладают зёрна красновато-коричневого и тёмно-чайного цветов; встречаются индивиды розового и бледно-жёлтого цвета. Проявлены грани призм {100}, {110} и дипирамиды {111}. Внутреннее строение большинства зёрен характеризуется наличием ядер, окружённых зональными оболочками. В цирконе встречаются включения кварца, калиевого полевого шпата, апатита, флогопита, монацита и рутила.

Для изотопно-геохронологических исследований использовано 176 зёрен циркона, для которых по ядрам и оболочкам получено 253 оценки возраста. 109 из них являются конкордантными ($D < 5\%$), а 22 – субконкордантными ($5\% < D < 10\%$). На кривой относительной вероятности распределения возраста выделяется главный максимум 2100–2000 млн лет, куда попадает около 30% всех определений, и несколько слабо выраженных максимумов в интервале

3200–2500 млн лет (рис. 3). Единичные зёрна циркона имеют возраст 570–485 млн лет, соответствующий времени проявления в УБ метаморфизма, синхронного с Тиманским орогенезом на Урале [1, 7]. Отметим, что среди изученных зёрен циркона отсутствуют индивиды с возрастными 1650–1400 млн лет, установленными в пироксенитах ШС [11]. Возможно, это связано с низкими содержаниями циркона в ультрамафитах и флотационной крупностью (менее 50–60 мкм) его зёрен, что препятствует накоплению в осадочных породах.

Таким образом, в четвертичных отложениях из тектонического фрагмента в западной части УБ, где среди амфиболит-гнейсовой толщи залегают клинопироксениты докембрийского возраста, преобладает детритовый циркон с возрастом 2100–2000 млн лет. Этот интервал соответствует времени проявления гранулитового метаморфизма и мигматизации в Тараташском и Александровском блоках, породы которых послужили источником детритового циркона для песчаников в основании айской свиты рифея [4, 5, 19]. В нашем случае дальность переноса была незначительной, и источником кластического материала являются преимущественно, породы УБ, непосредственно окружающие клинопироксениты Шигирских сопок. Полученные результаты позволяют предположить, что в структуре УБ присутствуют метаморфические породы раннедокембрийского возраста, которые ранее

установлены не были. Наличие здесь протерозойских клинопироксенитов усиливает сходство в геологическом строении и эволюции Уфалейского блока с Тараташским и Александровским фрагментами Восточно-Европейской платформы, выведенными в структуры складчатого Урала.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны рецензенту, члену-корреспонденту РАН Н.Б. Кузнецову, за замечания, позволившие улучшить рукопись.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены за счёт средств Российского научного фонда, грант № 23-17-00224. <https://rscf.ru/project/23-17-00224>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пучков В. Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.
2. Echtler H. P., Ivanov K. S., Ronkin Y. L., Karsten L. A., Hetzel R., Noskov A. G. The tectono-metamorphic evolution of gneiss complexes in the Middle Urals, Russia: a reappraisal // *Tectonophysics*. 1997. V. 276. № 1–4. P. 229–251.
3. Синдерн С., Ронкин Ю. Л., Хетцель Р., Шульте Б. А., Крамм У., Маслов А. В., Лепихина О. П., Попова О. Ю. Тараташский и александровский метаморфические комплексы (Южный Урал): Р-Т ограничения // *Ежегодник-2005*. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2006. С. 322–330.
4. Тевелев А. В., Кошелева И. А., Тевелев А. В., Хотылев А. О., Мосейчук В. М., Петров В. И. Новые данные об изотопном возрасте тараташского и александровского метаморфических комплексов // *Вестник МГУ*. 2015. Сер. 4. Геология. № 1. С. 27–42.
5. Ронкин Ю. Л., Синдерн С., Лепихина О. П. Изотопная геология древнейших образований Южного Урала // *Литосфера*. 2012. № 5. С. 50–76.
6. Краснобаев А. А., Русин А. И., Бушарина С. В., Чередниченко Н. В., Давыдов В. А. Состав, цирконы и цирконовая геохронология метаморфитов уфалейского комплекса // *Тр. ИГГ УрО РАН*. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2010. Вып. 157. С. 273–279.
7. Шардакова Г. Ю. Гранитоиды Уфалейского блока: геодинамические обстановки, возраст, источники, проблемы // *Литосфера*. 2016. № 4. С. 133–137.

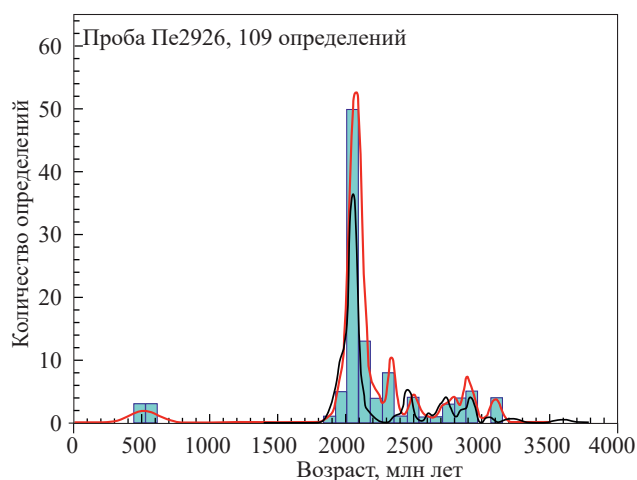


Рис. 3. Гистограмма распределения и кривая относительной вероятности (красная линия) возрастов детритового циркона из четвертичных отложений Уфалейского блока ($n = 109$). Чёрная линия — кривая относительной вероятности распределения возрастов детритового циркона из песчаников айской свиты рифея [19]

8. Белковский А. И. Геология и минералогия кварцевых жил Кыштымского месторождения (Средний Урал). Миасс: ИМИН УрО РАН, 2011. 234 с.
9. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Издание второе. Серия Южно-Уральская. Лист N-41-I (Кыштым). Объяснительная записка / Н. С. Кузнецов, Б. А. Пужаков, В. Д. Шох и др.; Минприроды России, Роснедра, Челябинскнедра, ОАО "Челябинскгеосъемка". М.: Московский филиал ФГБУ "ВСЕГЕИ", 2021. 181 с.
10. Пушкарёв Е. В., Рязанцев А. В., Готтман И. А., Дегтярев К. Е., Каменецкий В. С. Анкарамиты — новый тип магнезиальных, высоко-кальциевых примитивных расплавов в Магнитогорской островодужной зоне на Южном Урале // ДАН. 2018. Т. 479. № 4. С. 433–437.
11. Краснобаев А. А., Пушкарёв Е. В., Бушарина С. В., Готтман И. А. Цирконология клинопироксенитов Шигирских сопков (Уфалейский комплекс, Южный Урал) // ДАН. 2013. Т. 450. № 5. С. 586–591.
12. Пыстин А. М., Пыстина С. Н., Ленных В. И. Изменения химического и минерального состава габброидов при метаморфизме (западный склон Южного Урала) // Щелочные, основные и ультраосновные комплексы Урала. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1976. С. 41–54.
13. Краснобаев А. А., Пучков В. Н., Бушарина С. В., Козлов В. И., Пресняков С. Л. Цирконология израндитов (Южный Урал) // ДАН. 2011. Т. 439. № 3. С. 394–398.
14. Jackson S. E., Pearson N. J., Griffin W. L., Belousova E. A. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U–Pb zircon geochronology // *Chemical Geology*. 2004. V. 211(1–2). P. 47–69.
15. Horstwood M. S. A., Košler J., Gehrels G. et al. Community-Derived Standards for LA-ICP-MS U–(Th–)Pb Geochronology Uncertainty Propagation, Age Interpretation and Data Reporting // *Geostandards and Geoanalytical Research*. 2016. V. 40. № 3. P. 311–332.
16. Van Achterbergh E., Ryan C. G., Jackson S. E., Griffin W. L. LA-ICP-MS in the Earth Science — Appendix 3, data reduction software for LA-ICP-MS. Ed. P. J. Sylvester // *Mineral. Assoc. Canada. Short Course*. 2001. V. 29. P. 239–243.
17. Andersen T. Correction of common lead in U–Pb analyses that do not report ^{204}Pb // *Chemical Geology*. 2002. V. 192. № 1–2. P. 59–79.
18. Gehrels G. E. / In: *Tectonics of Sedimentary Basins: Recent Advances*. Chichester: Wiley/Blackwell, 2012. P. 47–62.
19. Кузнецов Н. Б., Маслов А. В., Белоусова Е. А., Романюк Т. В., Крупенин М. Т., Горожанин В. М., Горожанина Е. М., Серегина Е. С., Цельмович В. А. Первые результаты U–Pb LA-ICP-MS-изотопного датирования обломочных цирконов из базальных уровней стратотипа рифея // ДАН. 2013. Т. 451. № 3. С. 308–313.

EVIDENCE OF THE EARLY PRECAMBRIAN AGE OF THE METAMORPHIC ROCKS FROM THE UFALEY BLOCK (MIDDLE URALS): RESULTS OF U–Th–Pb (LA-ICP-MS) DATING OF DETRITAL ZIRCON FROM THE QUATERNARY DEPOSITS

© 2025 G. Yu. Shardakova (<https://orcid.org/0000-0002-0587-8416>)^{a, #},
E. V. Pushkarev (<https://orcid.org/0000-0003-0912-8580>)^a,
Corresponding Member of the RAS A. B. Kotov (<https://orcid.org/0000-0002-4584-371X>)^b,
A. O. Simankova^a

^a*Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yekaterinburg, Russia*

^b*Institute of Precambrian Geology and Geochronology of the Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg, Russia*

[#]*E-mail: shardakovagalina@mail.ru*

U–Th–Pb (LA-ICP-MS) geochronological studies of detrital zircon from the Quaternary deposits of the western part of the Ufaley block in the Middle Urals, in a tectonic fragment composed of amphibolite-gneiss complex and associated bodies of Precambrian clinopyroxenites, were performed. The main statistical age maximum corresponds to the range of 2100–2000 Ma. Several small peaks correspond to the range of 3200–2500 Ma. So there is the real reason to believe that rocks of the Early Precambrian age are present within the Ufaley block. They were not previously identified here.

Keywords: detrital zircon, U–Th–Pb isotope studies, quaternary deposits, age of the substrate