



УДК 550.42

<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2023.43.19>

Циркон как источник генетической информации в верхнерифейских терригенных отложениях Южного Тимана

О. В. Гракова, Н. Ю. Никулова, С. И. Исаенко*

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар, Россия

Аннотация. Приведены результаты изучения циркона из верхнепротерозойских метаосадочных отложений Южного Тимана методом рамановской спектроскопии. По морфологическим особенностям, химическому составу, внутреннему строению и степени кристалличности выделены четыре типа циркона. Выполнена съемка рамановских спектров всех морфологических типов исследуемого минерала. Осуществлен сравнительный анализ рамановских характеристик, показавший, что первый тип отличается наиболее высокой степенью кристалличности, третий – минимальной, а второй тип занимает промежуточное положение; четвертый тип – уникальный высокофосфористый циркон, характер спектров которого отражает присутствие Y, P, PЗЭ и других элементов-примесей, а также указывает на его метамиктизацию в результате радиационного нарушения структуры. Выявлено, что морфологические особенности, различия в химическом составе и характеристиках КР-спектров выделенных типов циркона указывают на различие источников, из которых они попали в осадочную породу.

Ключевые слова: верхнерифейские терригенные отложения, Южный Тиман, рамановская спектроскопия, циркон.

Благодарности. Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН «Глубинное строение, геодинамическая эволюция, взаимодействие геосфер, магматизм, метаморфизм и изотопная геохронология Тимано-Североуральского литосферного сегмента» (номер государственного учета ЕГИСУ НИОКТР 122040600012-2) и «Осадочные формации: вещество, седиментация, литогенез, геохимия, индикаторы литогенеза, реконструкция осадконакопления» (номер государственного учета ЕГИСУ НИОКТР 122040600013-9).

Для цитирования: Гракова О. В., Никулова Н. Ю., Исаенко С. И. Циркон как источник генетической информации в верхнерифейских терригенных отложениях Южного Тимана // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2023. Т. 43. С. 19–29. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2023.43.19>

Original article

Zircon as a Source of Genetic Information in Upper Riphean Terrigenous Deposits of Southern Timan

O. V. Grakova, N. Yu. Nikulova, S. I. Isaenko*

Institute of Geology FIC Komi Scientific Center UB RAS, Syktyvkar, Russian Federation

Abstract. Zircon is an important source of genetic information. The purpose of the research is a detailed study, identification of diagnostic features, and determination of the evolution of the compo-

sition of zircon, which will make it possible to establish the sources of clastic material and the conditions for the formation of the paleontologically mute terrigenous Dzhezhim Formation on the Dzhezhimparma Rise (Southern Timan). The article presents the results of the study of zircon from the Upper Proterozoic metasedimentary deposits of the South Timan by Raman spectroscopy. According to morphological features, chemical composition, internal structure and degree of crystallinity, four types of zircon have been distinguished. The Raman spectra of all morphological types of the studied mineral was surveyed. A comparative analysis of the Raman characteristics showed that the first type is characterized by the highest degree of crystallinity, the third type is characterized by the minimum, and the second type occupies an intermediate position. The fourth type is a unique high-phosphorus zircon, the nature of its spectra reflects the presence of Y, P, REE, and other impurity elements, and also indicates its metamictization as a result of radiation damage to the structure. Morphological features, differences in the chemical composition and characteristics of the Raman spectra of the distinguished types of zircon indicate the difference in the sources from which they entered the sedimentary rock. The source of type I zircon could be felsic igneous rocks. Type II and III zircons are probably of metamorphogenic origin. The formation of the modern composition and appearance of zircons of the fourth type, the formation of which is associated with a high-temperature magmatic source, is due to multiphase transformations in hydrothermal-metamorphic and epigenetic processes. We believe that type IV zircons have the longest history of existence. This is evidenced by their high metamict, i.e., the destruction of the crystal lattice under the action of U and Th radiation, which depends on their number and the age of zircon grains. It is known that the age of zircon of the Dzhezhim Formation is pre-Upper Riphean; during its existence, the mineral was repeatedly subjected to various external influences that changed the parameters of its crystal structure.

Keywords: Upper Riphean terrigenous deposits, South Timan, Raman spectroscopy, zircon.

For citation: Grakova O. V., Nikulova N. Yu., Isaenko S. I. Zircon as a Source of Genetic Information in Upper Riphean Terrigenous Deposits of Southern Timan. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2023, vol. 43, pp. 19-29. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2023.43.19> (in Russian)

Введение

Циркон является важным источником генетической информации, широко используемым в геологических исследованиях, так как обладает высокой физико-химической устойчивостью к воздействию наложенных процессов [Ляхович, 1963; Пыстина, Пыстин, 2002]. Целью исследований является детальное изучение, выявление диагностических признаков, установление эволюции состава циркона, в том числе его редкой высокофосфористой разновидности, что позволит установить источники обломочного материала и условия формирования палеонтологически немой терригенной джежимской свиты на возвышенности Джежимпарма (Южный Тиман). Для этого был использован метод рамановской спектроскопии, который дает возможность локально (до 1 мкм) оценить степень кристалличности-метамиктности структуры циркона.

Известно, что на кристаллическую решетку минералов влияет множество факторов, отражающихся на характеристиках КР-спектров: химический состав минерала, присутствие элементов-примесей, включений минералов и флюидов, *P-T*-условия образования. Изучение КР-спектров позволяет выявить особенности внутреннего строения цирконов, в том числе эффекты радиационного и химического разупорядочения минералов. При увеличении структурных повреждений кристаллической решетки изменяются линии характеристических колебаний – интенсивность спектра уменьшается, полосы в КР-спектре уширяются и смещаются в сторону уменьшения волнового

числа. При дальнейшем увеличении аморфизации циркона полосы в КР-спектре становятся асимметричными [Nasdala, Irmer, Wolf, 1995].

Исследованы цирконы из метапесчаников джежимской свиты верхнего рифея в карьере Асывож ($61^{\circ}47'11.5''$ с. ш., $54^{\circ}06'35.2''$ в. д.) на возвышенности Джежимпарма (Южный Тиман), подробное описание литологических и геохимических особенностей которых приведено нами ранее [Никулова, 2017; Гракова, 2021]. Верхнерифейский возраст метапесчаников джежимской свиты и принадлежность выделенных возрастных групп цирконов к определенным типам магматических пород установлены Н. Б. Кузнецовым и соавторами [Первые результаты ... , 2010] на основе U/Pb-датирования и изотопно-геохимического изучения детритных цирконов.

Методы исследования

Циркон из метаосадочных отложений верхнерифейской джежимской свиты изучен методом рамановской спектроскопии на КР-спектрометре LabRam HR800 (Horiba Jobin Yvon) (аналитик С. И. Исаенко). Морфология и химический состав циркона исследовались с помощью сканирующих электронных микроскопов TESCAN VEGA 3 LMN с энергодисперсионной приставкой X-MAX 50 mm² Oxford instruments, при ускоряющем напряжении 20 кВ, размере пучка 180 нм и области возбуждения до 5 мкм с калибровкой по Со и стандартами фирмы Micro-Analysis Consultants ltd (аналитики А. С. Шуйский, Е. М. Тропников) и JSM-6400 с энергетическим спектрометром Link с ускоряющим напряжением 20 кВ, током на образцах $2 \cdot 10^{-8}$ А и сертифицированными стандартами Microspec (аналитик В. Н. Филиппов). Исследования проведены в ЦКП «Геонаука» ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар).

Морфологические особенности и геохимическая характеристика цирконов

По морфологическим и геохимическим особенностям в метапесчаниках джежимской свиты выделены четыре типа циркона.

I – бледно-розовые до бесцветных дипирамидально-призматические слабо- и среднеокатанные кристаллы с относительно гладкой поверхностью граней (рис. 1, а). Состав циркона I типа: ZrO₂ 63,50–65,05; SiO₂ 32,98–33,89; HfO₂ 1,23–1,54; Fe₂O₃ 0,25–0,43; CaO 0,17–0,40 мас. %.

II – розовые среднеокатанные кристаллы призматического габитуса и хорошо окатанные удлиненные зерна с единичными микрозернами и призмами ксенотима на поверхности (см. рис. 1, б). Циркон II типа имеет следующий состав: ZrO₂ 60,77–63,74; SiO₂ 29,58–31,74; HfO₂ 1,02–1,68; Fe₂O₃ 0,52–3,21; CaO 0,41–0,80; P₂O₅ 2,04–2,25 мас. %.

III – бледно-розовые, почти бесцветные, окатанные, иногда почти изометричные прозрачные зерна с гладкой или мелкоямчатой поверхностью, редкими микрозернами ксенотима и чешуйками слюды на поверхности (см. рис. 1, в). Циркон III типа содержит: ZrO₂ 62,97–65,40; SiO₂ 33,05–33,41; HfO₂ 0,79–1,08; CaO 0,22–0,56 мас. %.

IV – буровато-оранжевые преимущественно хорошо окатанные «бочонковидные» зерна, иногда почти изометричные, с трещиноватой поверхностью, со множеством углублений и сколов на поверхности. Ксенотим развивается вдоль трещин или покрывает поверхность зерен сплошной корочкой (рис. 1 з). Циркон этого типа имеет наиболее сложный химический состав: ZrO_2 41,91–61,26; SiO_2 13,91–27,35; HfO_2 0,63–2,06; P_2O_5 1,2–7,56; Fe_2O_3 0,18–3,27; CaO 0,14–2,73; Y_2O_3 1,1–6,63; ThO_2 0,29–2,32; Sc_2O_3 0,15–0,71; Al_2O_3 0,52–1,31; UO_2 0,33–0,39; Ce_2O_3 0,30–0,37; Nd_2O_3 0,27–0,53; Dy_2O_3 1,01; Yb_2O_3 0,59–0,89; Er_2O_3 0,12–0,56 мас. %.

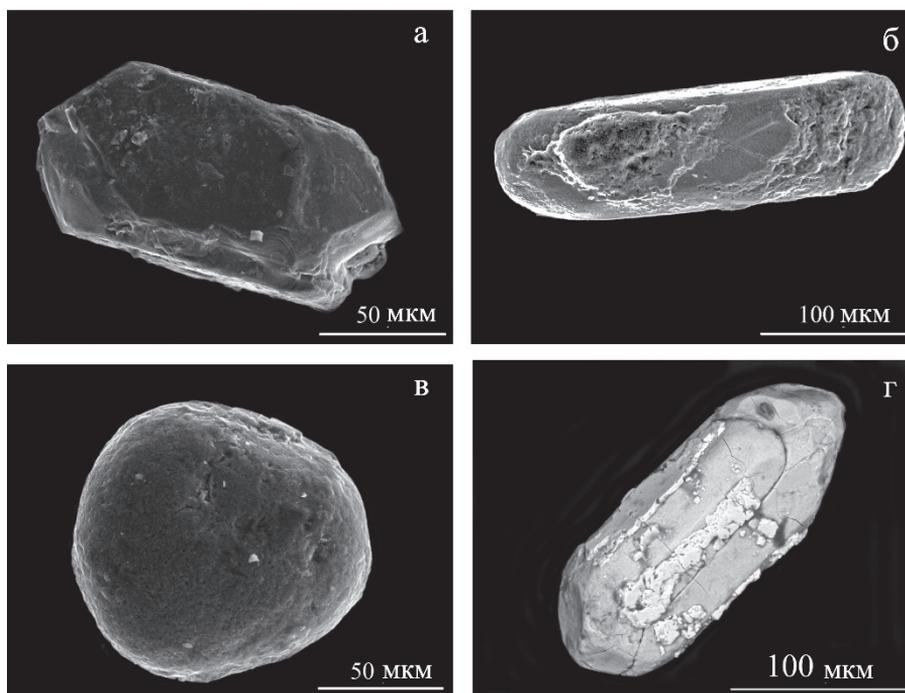


Рис. 1. Морфотипы циркона: а – дипирамидально-призматический кристалл (I тип); б – среднеокатанный призматический кристалл с примазкой ксенотима и слюды (II тип); в – окатанное зерно (III тип); г – трещиноватый дипирамидально-призматический кристалл с микрозернами ксенотима вдоль трещин (IV тип)

Содержание основных элементов – ZrO_2 и SiO_2 – в цирконе I–III типов постоянно и примерно соответствует их содержанию в «классическом» цирконе. В цирконе IV типа их содержится значительно меньше. Также во всех типах циркона установлено присутствие приблизительно равных количеств CaO , Fe_2O_3 и HfO_2 . В цирконе II и IV типов, кроме перечисленных примесей, присутствует P_2O_5 . В отдельных зернах циркона IV типа содержание P_2O_5 достигает 7,56 мас. %. Кроме того, в этом цирконе установлено присутствие Y_2O_3 , ThO_2 , Sc_2O_3 , Al_2O_3 , UO_2 и REE-оксидов.

КР-спектры циркона

Для того чтобы оценить различие выделенных морфологических типов циркона, выполнена регистрация КР-спектров (рис. 2). В стандартном КР-спектре циркона с ненарушенной кристаллической структурой присутствуют полосы: 202, 214, 225, 355, 393, 439, 974, 1008 см^{-1} , наиболее интенсивные из которых: 355, 439, 1008 см^{-1} [Hoskin, Rodgers, 1996].

Полученные методом рамановской спектроскопии положение максимума линий (P) и полуширина (FWHM) основных полос для цирконов выделенных морфологических типов приведены в таблице. КР-спектры выделенных морфологических типов циркона отличаются по форме кривых, интенсивности пиков и ширине полос.

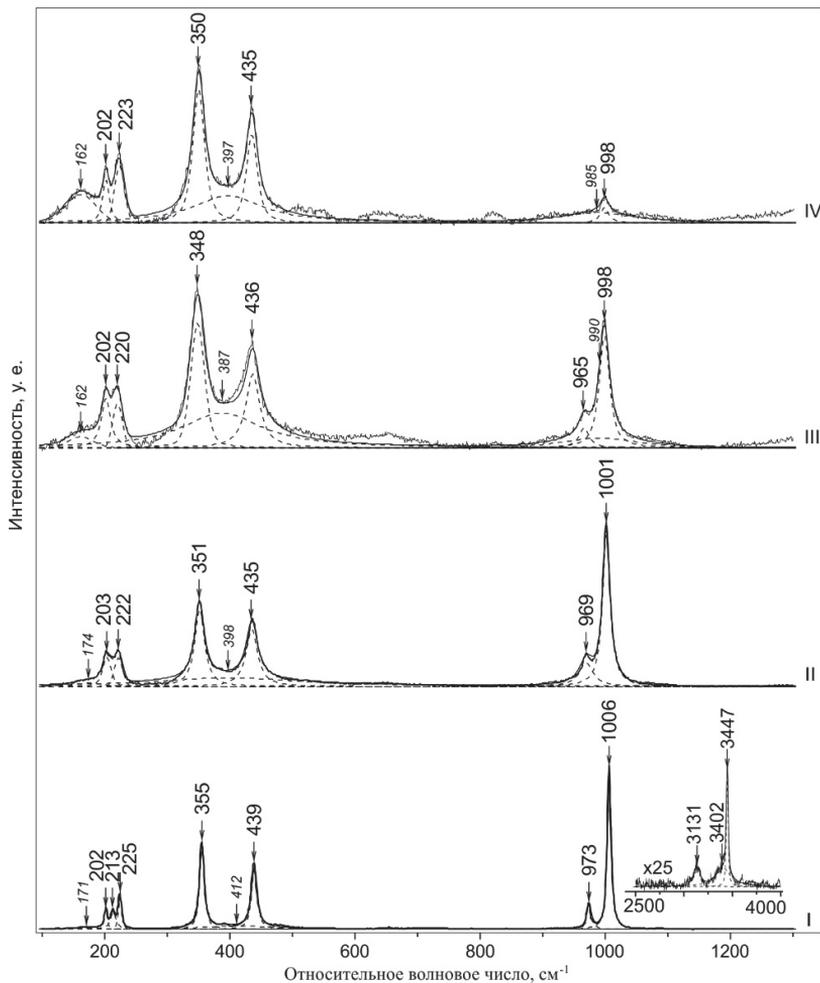


Рис. 2. КР-спектры циркона джежимской свиты.

На вкладке внизу диапазон 2500–4000 см^{-1} циркона I типа, x25 – усиление сигнала.

Римские цифры соответствуют I–IV типам циркона

I тип циркона отличается наличием всех «стандартных» полос в КР-спектре (см^{-1}): 202, 213, 225, 355, 439, 973, 1006, 3131, 3402, 3447. Отметим, что только в КР-спектрах циркона I типа наблюдаются полосы воды 3131, 3402, 3447 см^{-1} интенсивностью в 25 раз меньше основной линии 1006 см^{-1} . В КР-спектрах циркона II типа в спектрах выделены полосы 203, 222, 351, 435, 969, 1001 см^{-1} , некоторые полосы отсутствуют, отмечаются сдвиг полос в сторону низких частот и падение интенсивности полос. В спектрах циркона III типа увеличивается свидетельствующее о большем нарушении структуры смещение полос 202, 220, 348, 436, 965, 998 см^{-1} .

Кроме перечисленных выше, в КР-спектрах циркона после декомпозиции выделены широкие полосы, служащие показателем появления некристаллических фаз Zr-O [Titorenkova, Mihailova, Konstantinov, 2006]: 171 и 412 см^{-1} для циркона I типа; 174, 398 см^{-1} – для II типа; 162, 387 и 990 см^{-1} – для III типа; 162, 397, 985 см^{-1} – для IV (см. рис. 2, выделены курсивом). С уменьшением степени кристалличности циркона растет доля аморфной компоненты, которая может быть оценена по формуле: $A = (\Sigma_{\text{аморф}} / (\Sigma_{\text{аморф}} + \Sigma_{\text{крист}})) \cdot 100\%$, где $\Sigma_{\text{аморф}}$ – сумма интегральных интенсивностей широких полос (аморфной компоненты), $\Sigma_{\text{крист}}$ – сумма интегральных интенсивностей узких линий (кристаллической компоненты). Результаты оценки аморфной составляющей в цирконах, определенных по КР-спектрам, показаны на рис. 3.

Например, для циркона I типа величина аморфной компоненты составила 14 %, а для цирконов IV типа 49 %. Сдвиг полос в коротковолновую сторону в КР-спектрах, обогащенных элементами-примесями циркона IV типа, отражает влияние примесей, главным образом РЗЭ, на структуру минерала [Кожевников, Ивашевская, Кевлич, 2015; Metamictization of zircon ... , 2000].

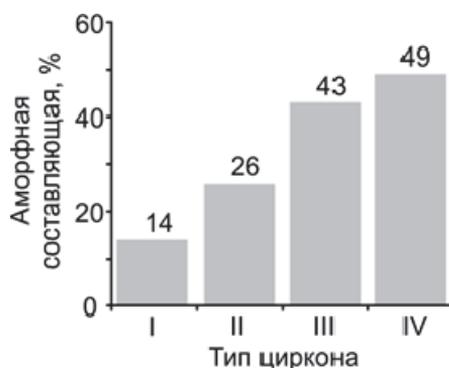


Рис. 3. Аморфная составляющая в цирконе, определенная по КР-спектрам, на структуру минерала [Кожевников, Ивашевская, Кевлич, 2015; Metamictization of zircon ... , 2000]

Обсуждение результатов

Для каждого изученного типа циркона характерен свой вид КР-спектра, отличающийся набором определенных полос, их сдвигом относительно стандартного положения и изменением их полуширины. Установлено последовательное уменьшение степени кристалличности от типа I к III до аморфного метамиктного состояния циркона IV типа.

От I к III типу циркона наблюдается уменьшение интенсивности и уширение полос в КР-спектрах. I тип выделяется присутствием в КР-спектре широких полос в диапазоне $3131\text{--}3447\text{ см}^{-1}$, которые могут быть обусловлены небольшими примесями ионов $\text{OH}/\text{H}_2\text{O}$ [Radiation damage ... , 1998; Spectroscopic methods applied ... , 2003]. В цирконе IV типа также есть признаки гидратации зерен, но интенсивный фон, перекрывающий КР-спектр в диапазоне $3000\text{--}3500\text{ см}^{-1}$, не позволяет наблюдать полосы воды.

Уменьшение степени кристалличности от I к III типу циркона иллюстрируют графики отношения полуширины от положений максимумов основных линий в КР-спектрах (рис. 4). Точка, соответствующая циркону IV типа, отклоняется от тренда, что указывает на возможное радиационное повреждение и/или аморфное состояние зерен. Положение линий и их полуширина соответствуют усредненным значениям по выборкам (см. рис. 4). Нанесение на эти графики результатов анализа новых образцов позволяет, ориентируясь на полуширину линии, сравнивать их с уже изученными и делать предварительные выводы о степени преобразованности.

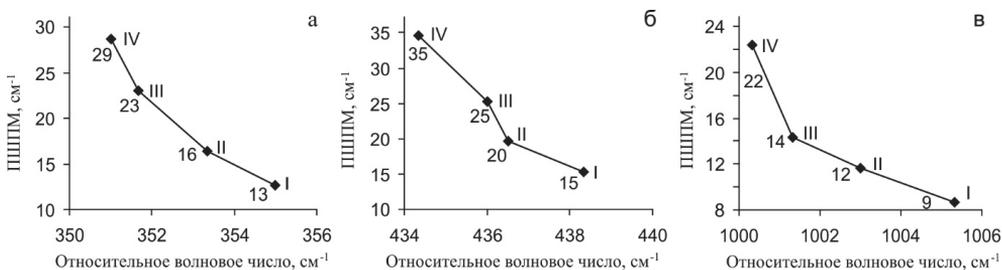


Рис. 4. Графики зависимости полуширины линий (FWHM) от положений максимумов основных линий в КР-спектрах циркона (а – 355 см^{-1} ; б – 439 см^{-1} ; в – 1008 см^{-1}).

Цифрами I, II, III, IV отмечены типы циркона, рядом соответствующее значение полуширины линий

Интенсивность основных максимумов КР-спектров в диапазоне $200\text{--}1200\text{ см}^{-1}$ также зависит от степени кристалличности циркона (рис. 5).

Различия КР-спектров циркона I–IV типов обусловлены составом микропримесей в различных типах циркона. Сдвиг линий в низкочастотную область спектра может быть связан с увеличением структурных напряжений. Состав, а вслед за ним и особенности КР-спектров различных типов цирконов обусловлены происхождением минерала, различным составом материнских пород, служившим источником циркона.

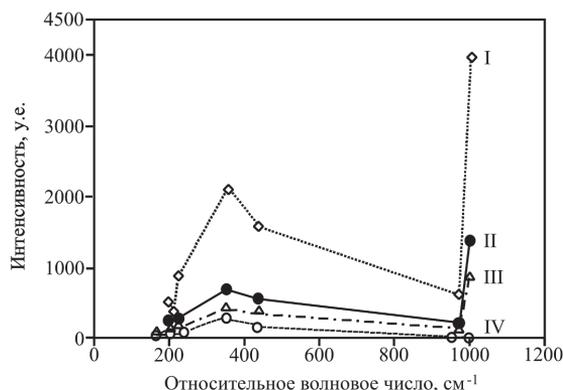


Рис. 5. Интенсивность максимумов линий в КР-спектрах циркона джежимской свиты

В КР-спектре одного из изученных зерен циркона IV типа присутствуют интенсивные широкие полосы, указывающие на структурное повреждение кристалла (аморфизацию). В исследуемом цирконе IV типа полуширина линии 1008 см⁻¹ находится в интервале 14–50 см⁻¹ и в большинстве случаев превышает пороговое значение 30 см⁻¹ (табл.), характерное для циркона с высокой степенью радиационного повреждения. Повышенный уровень метамиктности при неполной аморфизации может быть также результатом вторичной перекристаллизации циркона [Radiation damage ... , 1998; Spectroscopic methods ... , 2003].

Таблица

Характеристики полос КР-спектров циркона джежимской свиты (см⁻¹)

Тип	P	FWHM	P	FWHM								
I	202	6	224	8	355	9	439	11	973	8	1006	7
	202	5	224	6	355	11	438	13	973	11	1006	8
	204	10	225	10	355	18	438	22	972	14	1004	11
II	202	12	221	17	352	22	435	25	969	18	1001	14
	204	15	223	13	353	15	435	19	970	13	1003	12
	202	7	224	9	355	12	438	15	973	10	1005	9
III	202	24	221	15	348	31	434	33	966	26	998	20
	202	10	223	9	354	10	438	11	972	10	1004	7
	206	20	225	16	353	28	438	32	971	34	1002	16
IV	203	10	223	16	351	26	435	26	966	8	1000	14
	204	44	225	14	351	33	435	47	973	34	1001	30
	203	13	223	14	351	27	433	31	–	–	1000	23
	–	–	224	8	346	58	414	46	–	–	1002	50
	203	12	223	22	350	36	434	35	–	–	1000	28
min	202	5	221	6	346	9	414	11	966	8	998	7
max	206	44	225	22	355	58	439	47	973	34	1006	50
d	4	39	4	15	9	48	25	36	7	26	8	43

Примечание. P – положение максимума линии, FWHM – значение ширины линии на половине ее максимума, min – минимальное значение величины, max – максимальное значение, d – диапазон разброса значений (max – min).

КР-спектры циркона из магматических пород отличаются высокой интенсивностью линий и сдвигом в сторону увеличения волнового числа, что характерно для дипирамидально-призматических не содержащих примесей цирконов I типа (см. рис. 4), положение КР-полос II и III типов характерны для циркона из метаморфических пород – спектры с низкой интенсивностью сдвинутых в сторону уменьшения волнового числа линий [Bao, Zhang, 1998].

Циркон IV типа, отличающийся непостоянством химического состава, сложным рельефом поверхности и разнообразием КР-спектров, имеет неоднородное строение. Он содержит значительные количества флуоресцентных примесей, характерных для высокотемпературных (более 700 °C) разновидностей магматических цирконов, происходящих из гранитов или гранитных пегматитов [Bao, Gan, 1996]. Часть примесей могла быть получена цирконом в составе обломочной породы в результате переработки на этапе метаморфических преобразований. В результате метамиктизации и гидратации интенсивность КР-спектра снизилась, полуширина пиков увеличилась [Gao, 1987].

Заключение

КР-спектры выделенных типов циркона различаются по содержанию элементов-примесей, с увеличением количества которых изменяются и характеристики линий в КР-спектрах, в связи с чем I тип имеет наиболее высокую, II – среднюю, а III тип – самую низкую степень кристалличности. Уширение полос в КР-спектрах циркона IV типа указывает на его метамиктизацию, обусловленную радиационным нарушением структуры, а интенсивные широкие полосы в КР-спектре одного из зерен IV типа может указывать на аморфизацию кристалла. Сдвиг полос в сторону уменьшения относительного волнового числа на несколько единиц в спектрах, содержащих примеси циркона IV типа, подтверждает связь характеристик полос КР-спектров с содержанием примесей в цирконах.

Особенности морфологии, химических составов, внутреннего строения и характеристики КР-спектров выделенных типов циркона указывают на различие источников, из которых они попали в осадочную породу. Источником циркона I типа могли быть кислые магматические породы. Цирконы II и III типов, вероятно, имеют метаморфогенное происхождение. Формирование современного состава и облика циркона IV типа, образование которого связано с высокотемпературным магматическим источником, обусловлено многофазными преобразованиями в гидротермально-метаморфических и эпигенетических процессах. Мы полагаем, что циркон IV типа имеет самую длинную историю существования, на это указывает его высокая метамиктность – разрушение кристаллической решетки под действием излучения U и Th, зависящее от их количества и возраста зерен циркона. Известно, что возраст циркона джежимской свиты доверхнерифейский [Первые результаты ... , 2010], во время своего существования минерал неоднократно подвергался различным внешним воздействиям, изменявшим параметры его кристаллической структуры.

Список литературы

- Гракова О. В. Алмазопоявления Среднего и Южного Тимана. Сыктывкар, 2021. 144 с.
- Кожневиков В. Н., Ивашевская С. Н., Кевлич В. И. Геохимия и рамановские спектры цирконов из рудных (PGE-Au) амфиболитов массива Травяная губа, Сев. Карелия // Труды Карельского НЦ РАН. 2015. № 7. С. 36–53.
- Ляхович В. В. Акцессорные минералы как индикаторы геологических процессов // Новые методы в минералогии и петрографии. М., 1963. С. 63.
- Никулова Н. Ю. Состав и условия образования терригенных пород верхнего рифея (возвышенность Дзержимпарма, Южный Тиман) // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2017. № 4. С. 27–35.
- Первые результаты U/Pb-датирования и изотопно-геохимического изучения детритных цирконов из позднедокембрийских песчаников Южного Тимана (увал Дзержим-Парма) / Н. Б. Кузнецов, Л. М. Натапов, Е. А. Белоусова [и др.] // Доклады Академии наук. 2010. № 435 (6). С. 798–805.
- Пыстина Ю. И., Пыстин А. М. Цирконовая летопись Уральского докембрия. Екатеринбург : УрО РАН, 2002. 167 с.
- Bao X., Zhang A. Geochemistry of U and Th and its influence on the origin and evolution of the Earth's crust and the biological evolution // Acta Petrologica et Mineralogica. 1998. Vol. 17, N 2. P. 160–172.
- Bao X., Gan X. The minerageny of two groups of zircons from plagioclase amphibolite of Mayuan group in northern Fujian // Acta Petrologica et Mineralogica. 1996. Vol. 15, N 1. P. 73–79.
- Gao S. The zircon features from two kinds of mineralized granites in Yanshan age // Acta Petrologica Sinica. 1987. N 4. P. 63–71.
- Hoskin P. W. O., Rodgers K. A. Raman spectral shift in the isomorphous series (Zr1-xHfx)SiO4 // Eur. J. Solid State Inorg. Chem. 1996. N 33. P. 1111–1121.
- Metamictization of zircon: Raman spectroscopic study / M. Zhang, E. K. H. Salje, I. Farnan [et al.] // J. Phys. 2000. N 12. P. 1915–1925.
- Nasdala L., Irmer G., Wolf D. The degree of metamictization in zircon: a Raman spectroscopic study // Eur. J. Mineral. 1995. N 7. P. 471–478.
- Radiation damage in zircon and monazite / A. Meldrum, L. A. Boatner, W. J. Weber, R. C. Ewing // Geochim. Cosmochim. Acta, 1998. N 62. P. 2509–2520.
- Spectroscopic methods applied to zircon / L. Nasdala, M. Zhang, U. Kempe, G. Panczer [et al.] // Zircon. Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2003. N 53. P. 427–468.
- Titorenkova R., Mihailova B., Konstantinov L. Raman spectroscopic study of variably recrystallized metamict zircon from amphibolite-facies metagranites, Serbo-Macedonian massif, Bulgaria // Canadian Mineralogist, 2006. N 44. P. 1357–1366.

References

- Grakova O.V. *Almazoprojavenija Srednego i Juzhnogo Timana* [Diamond occurrences in the Middle and Southern Timan]. Syktyvkar, 2021, 144 p. (in Russian)
- Kozhevnikov V.N., Ivashkevskaja S.N., Kevlich V.I. Geochemija i ramanovskie spektry cirkonov iz rudnyh (PGE-Au) amfibolitov massiva Travjanaja guba, Sev. Karelija [Geochemistry and Raman spectra of zircons from ore (PGE-Au) amphibolites of the Travyanaya Bay massif, Sev. Karelia]. *Tr. Karel. NC RAN* [r. Karelian. Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2015, no. 7, pp. 36-53. (in Russian)
- Ljahovich V.V. Akcessornyje mineraly kak indikatory geologicheskikh processov [Accessory minerals as indicators of geological processes]. *Novye metody v mineralogii i petrografii* [New methods in mineralogy and petrography.]. Moscow, 1963, 63 p. (in Russian)
- Nikulova N.Ju. Sostav i uslovija obrazovanija terrigenykh porod verhnego rifeja (vozvyshennost' Dzhezhiparma, Juzhnyj Timan) [Composition and formation conditions of Upper Riphean terrigenous rocks (Dzhezhiparma Rise, South Timan)]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Geologija i razvedka* [Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geology and exploration], 2017, no. 4, pp. 27-35. (in Russian)
- Kuznecov N.B., Nataпов L.M., Belousova E.A., Griffin U.L., ORejlli S., Kulikova K.V., Soboleva A.A., Udoratina O.V. Pervye rezul'taty U/Pb-datirovanija i izotopno-geohimicheskogo izuchenija detritnyh cirkonov iz pozdnedokembrijskih pes-čanikov Juzhnogo Timana (uval Dzhezhim-Parma) [First results U/Pb-dating and isotope-geochemical study of detrital zircons from

Late Precambrian sandstones of the South Timan (Dzhezhim-Parma ridge)]. *DAN* [Doklady Earth Sciences], 2010, no. 435 (6), pp. 798-805. (in Russian)

Pystina Ju.I., Pystin A.M. *Cirkonovaja letopis Ural'skogo dokembrija* [Zircon Chronicle of the Ural Precambrian]. Yekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2002, 167 p. (in Russian)

Bao X., Zhang A. Geochemistry of U and Th and its influence on the origin and evolution of the Earth's crust and the biological evolution. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 1998, no. 17(2), pp. 160-172.

Bao X., Gan X. The minerageny of two groups of zircons from plagioclase amphibolite of Mayuan group in northern Fujian. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 1996, no. 15 (1), pp. 73-79.

Gao S. The zircon features from two kinds of mineralized granites in Yanshan age. *Acta Petrologica Sinica*, 1987, no. 4, pp. 63-71.

Hoskin P. W. O., Rodgers K. A. Raman spectral shift in the isomorphous series $(Zr_{1-x}Hf_x)SiO_4$. *Eur. J. Solid State Inorg. Chem.*, 1996, no. 33, pp. 1111-1121.

Zhang M., Salje E. K. H., Farnan I., Graeme-Barber A., Daniel P., Ewing R. C., Clark A. M., Leroux H. Metamictization of zircon: Raman spectroscopic study. *J. Phys.*, 2000, no. 12, pp. 1915-1925.

Nasdala L., Irmer G., Wolf D. The degree of metamictization in zircon: a Raman spectroscopic study. *Eur. J. Mineral*, 1995, no. 7, pp. 471-478.

Meldrum A., Boatner L.A., Weber W.J., Ewing R.C. Radiation damage in zircon and monazite. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1998, no. 62, pp. 2509-2520.

Nasdala L., Zhang M., Kempe U., Panczer G., Gaft M., Andrut M., Plotze M. Spectroscopic methods applied to zircon. *Zircon. Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2003, no. 53, pp. 427-468.

Titorenkova R., Mihailova B., Konstantinov L. Raman spectroscopic study of variably recrystallized metamict zircon from amphibolite-facies metagranites, Serbo-Macedonian massif, Bulgaria. *Canadian Mineralogist*, 2006, no. 44, pp. 1357-1366.

Сведения об авторах

Гракова Оксана Васильевна

кандидат геолого-минералогических наук,
научный сотрудник

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ

УрО РАН

Россия, 167982, г. Сыктывкар,

ул. Первомайская, 54

e-mail: ovgrakova@geo.komisc.ru

Николова Наталия Юрьевна

доктор геолого-минералогических наук,
ведущий научный сотрудник

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ

УрО РАН

Россия, 167982, г. Сыктывкар,

ул. Первомайская, 54

e-mail: nikulova@geo.komisc.ru

Исаенко Сергей Иванович

кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ

УрО РАН

Россия, 167982, г. Сыктывкар,

ул. Первомайская, 54

e-mail: s.i.isaenko@gmail.com

Information about the authors

Grakova Oksana Vasilyevna

Candidate of Sciences (Geology and
Mineralogy), Research Scientist

Institute of Geology FIC Komi Scientific Center

UB RAS

54, Pervomayskaya st., Syktyvkar, 167982,

Russian Federation

e-mail: ovgrakova@geo.komisc.ru

Nikulova Natalia Yuryevna

Doctor of Sciences (Geology and Mineralogy),
Leading Research Scientist

Institute of Geology FIC Komi Scientific Center

UB RAS

54, Pervomayskaya st., Syktyvkar, 167982,

Russian Federation

e-mail: nikulova@geo.komisc.ru

Isaenko Sergey Ivanovich

Candidate of Sciences (Geology and
Mineralogy), Senior Research Scientist

Institute of Geology FIC Komi Scientific Center

UB RAS

54, Pervomayskaya st., Syktyvkar, 167982,

Russian Federation

e-mail: s.i.isaenko@gmail.com

Код научной специальности: 1.6.3

Статья поступила в редакцию 29.09.2022; одобрена после рецензирования 17.12.2022; принята к публикации 05.03.2023

The article was submitted September, 29, 2022; approved after reviewing December, 12, 2022; accepted for publication March, 5, 2023