

МЕТОДЫ И МЕТОДИКИ ПРОГНОЗА, ПОИСКОВ, ОЦЕНКИ
И РАЗВЕДКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 550.80:543.421/.424

Опыт применения ИК-микроскопии для исследования типоморфизма циркона при прогнозе и поисках месторождений цветных и благородных металлов

Хачатрян Г. К., Кряжев С. Г.
ЦНИГРИ, г. Москва, Россия

Аннотация. На примерах изучения кристаллов циркона, отобранных на Мечивеевской площади (Охотско-Чукотский вулканоплутонический пояс), в Сухоложском рудном поле и на месторождении Наталка, показана перспективность применения ИК-микроскопии при прогнозе и поисках месторождений цветных и благородных металлов. Важной типоморфной характеристикой циркона по данным ИК-микроскопии является степень структурного совершенства кристаллов. Этот диагностический признак зависит от состава, возраста, условий кристаллизации минерала и служит одним из критериев для выделения его генераций на поисковых площадях с множественными источниками циркона. Например, в ареалах развития потенциально золотоносных углеродисто-терригенных комплексов, прогнозно-поисковое значение имеет метасоматический новообразованный циркон, возраст которого совпадает со временем проявления основных этапов рудообразования.

Одним из показателей интенсивности гидротермальных преобразований циркона, определяемых по его ИК-спектрам, является относительное содержание адсорбированной воды в кристалле. Данный признак наиболее эффективен при поисках в районах развития относительно молодых вулканогенных и интрузивных формаций.

Ключевые слова: циркон, кристалл, U-Pb возраст, структурное совершенство, гидроксильные группы, адсорбированная вода, типоморфизм, ИК-микроскопия, ИК-спектр, рудные месторождения. Для цитирования: Хачатрян Г. К., Кряжев С. Г. Опыт применения ИК-микроскопии для исследования типоморфизма циркона при прогнозе и поисках месторождений цветных и благородных металлов. Руды и металлы. 2026. № 1. С. 25–34. DOI: 10.47765/0869-5997-2026-10002.

The practice of the zircon typomorphism studies using IR microscopy as applied to forecasting and prospecting for base and precious metals deposits

Khachatryan G. K., Kryazhev S. G.

Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals (FSBU TsNIGRI), Moscow, Russia

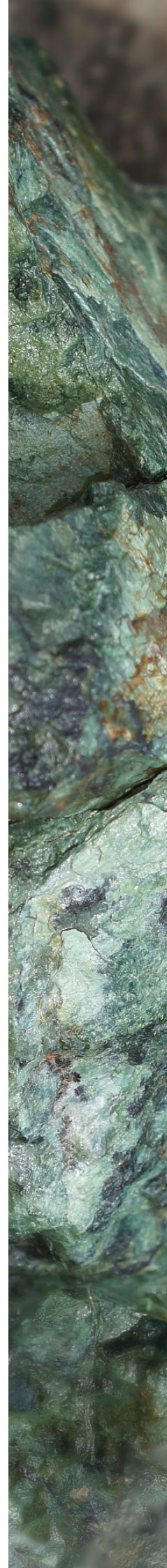
Annotation. A potential effectiveness of IR microscopy in application to forecasting and prospecting for base and precious metals deposits is demonstrated on examples of studying zircon crystals collected at the Mechiveem area (Okhotsk-Chukotka volcanoplutonic belt), Sukhoi Log ore field, and Natalka gold deposit.

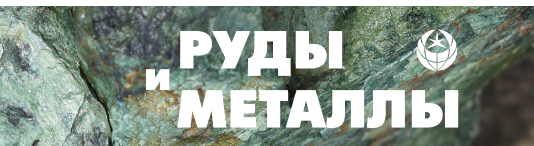
An important typomorphic characteristics of zircon, that is determined by IR microscopy, is the degree of structural perfection of the crystals. This diagnostic feature depends on the composition, age, and crystallization conditions of the mineral and serves as one of criteria for distinguishing its generations in exploration areas with multiple zircon sources. For example, in areas of distribution of potentially gold-bearing carbonaceous-terrigenous complexes, newly formed metasomatic zircon whose age coincides with the main ore formation stages is of forecasting and prospecting significance.

One indicator of the zircon hydrothermal transformations intensity, determined by its IR spectra, is the relative content of adsorbed water in the crystal. This feature is most effective for prospecting in areas of relatively young volcanic and intrusive formations.

Keywords: zircon, crystal, U-Pb age, structural perfection, hydroxyl groups, adsorbed water, typomorphism, IR microscopy, IR spectrum, ore deposits.

For citation: Khachatryan G. K., Kryazhev S. G. The practice of the zircon typomorphism studies using IR microscopy as applied to forecasting and prospecting for base and precious metals deposits. Rudy i metally (Ores and metals). 2026. No 1. pp. 25–34. DOI: 10.47765/0869-5997-2026-10002.





Введение

Циркон является распространённым акцессорным минералом разнообразных по составу магматических, метаморфических и метасоматических пород. Под действием флюидов первично магматические цирконы преобразуются за счёт диффузионно-реакционных процессов внутри кристаллов или за счёт их растворения-пересадки [4]. Условия кристаллизации и последующей эволюции этого минерала отражены в его типоморфных свойствах, которые могут быть использованы при разработке минералогических критериев прогноза и поисков коренных месторождений алмазов, цветных и благородных металлов. Подобные исследования особенно актуальны в связи с высокой устойчивостью циркона в поверхностных условиях и его способностью накапливаться в россыпях.

С учётом полигенеза и сложной истории кристаллизации циркона важной задачей шлихо-минералогических исследований является выявление в пробах тех его генераций, которые генетически связаны с оруденением. Эта задача может быть решена как с помощью установления возрастных соотношений ценного минерала и циркона, так и эмпирически, когда разные его генерации выделяются по комплексу типоморфных признаков.

Одним из экспрессных и информативных, но мало разработанных методов исследования минералов шлиховых проб является ИК-микроскопия. Она позволяет диагностировать подавляющее большинство прозрачных минералов и определять их типоморфные характеристики, такие как особенности кристаллической структуры, химического состава, наличие и содержание фазовых примесей [7]. Это было наглядно показано на примере минералов-спутников алмаза – пироба, хромдиоксида, форстерита, а также энстатита, циркона, апатита, кианита и рутила [6].

Цель настоящей работы – оценить возможности использования типоморфных свойств циркона, выявленных с помощью метода ИК-микроскопии, при прогнозировании и поисках месторождений цветных и благородных металлов.

Образцы и методы исследования

Объектами изучения послужили кристаллы циркона, отобранные из руд, вмещающих пород и современного аллювия на золоторудных объектах различного типа: в рудных полях месторождений Сухой Лог (400 образцов из 14 проб), Наталка (120 образцов из двух проб), а также в пределах Мечивеевской перспективной площади (Охотско-Чукотский вулкано-плутонический пояс с предполагаемым меднопорфировым и эпитермальным оруденением; 100 образцов из 10 проб).

Все цирконы анализировались с помощью ИК-Фурье спектрометра Nicolet 380 и ИК-Фурье микроскопа Centaurus компании THERMO Scientific в диапазоне 650–4000 см⁻¹. Запись спектров с разрешением 2–4 см⁻¹, их обработка и определение количественных характеристик осуществлялись с помощью специальной программы OMNIC, которой оснащены спектрометры Nicolet.

Выборочно проводилось изотопное U-Pb датирование имеющихся цирконов методом LA-ICP-MS, а также изучение их внутреннего строения методом катодной люминесценции. Эти анализы были выполнены в Центре изотопных исследований ВСЕГЕИ им. А. П. Карпинского.

ИК-микроскопия циркона

ИК-спектры цирконов в значительной мере зависят от упорядоченности их кристаллической структуры, а также от наличия в минерале разнообразных структурных и фазовых примесей.

В структуре циркона вдоль оси 4-го порядка тетраэдры SiO₄ чередуются с додекаэдрами ZrO₈, а атомы кислорода имеют тройную координацию (Zr, Zr, Si). Часть циркония в минерале (до 30 %) изоморфно замещается на гафний, обычны также примеси кальция, редких земель, тория, иттрия. Цирконы, в значимых количествах содержащие радиоактивные элементы, часто характеризуются аморфным состоянием (метамиктность). В них также отмечается повышенное содержание воды (до 11 %), тогда как в остальных цирконах содержание водной составляющей обычно не превышает 1–2 %.

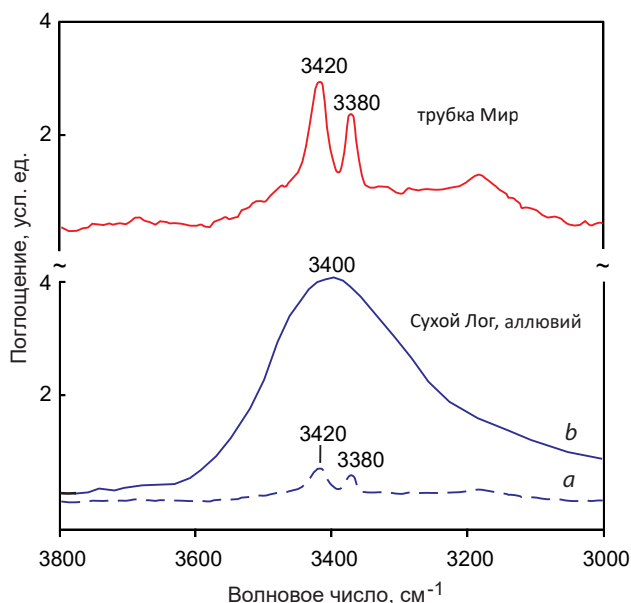


Рис. 1. Характерные спектры цирконов различного генезиса в области 3000–3800 см^{-1} : *a* – редкие, *b* – преобладающие

Fig. 1. Characteristic spectra of zircons of various genesis in the range of 3000–3800 cm^{-1} : *a* – rare, *b* – predominant

Типичными для спектров циркона, записанных под ИК-микроскопом, являются чёткий дублет около 1540–1600 см^{-1} и сложный максимум поглощения в области 1780–1950 см^{-1} , относящийся к обертонам валентных Si–O колебаний кремнекислородного тетраэдра [12].

В диапазоне 3000–3700 см^{-1} в спектрах цирконов имеются полосы поглощения разной конфигурации и интенсивности, относимые к валентным колебаниям молекулы воды и гидроксильных групп (рис. 1).

Установлено, что в спектре циркона по мере его метамиктизации в результате возрастающего радиационного воздействия число и резкость спектральных линий уменьшается [12]. Так, кристалл циркона ювелирного качества изначально характеризовался спектром из пяти линий: 1782, 1838, 1878, 1909, 1946 см^{-1} . С увеличением дозы облучения число полос уменьшилось до четырёх, затем до трёх вплоть до появления одного размытого максимума поглощения. Вместе с тем также исчезают

пики поглощения в диапазоне 3000–3700 см^{-1} . В связи с этим можно предположить, что спектральные характеристики природных цирконов соответствующим образом будут зависеть от содержания примесей радиоактивных элементов и от геологического возраста минерала. При равном содержании радиоактивных примесей наиболее совершенной структурой должны обладать самые молодые цирконы, а наименее совершенной, характеризующейся бесструктурным ИК спектром в области 1780–1950 см^{-1} , – наиболее древние.

По ИК-спектрам цирконы различного генезиса отличаются друг от друга. Например, цирконы из кимберлитов, как правило, обнаруживают в спектрах довольно интенсивные линии около 3380 и 3420 см^{-1} . По данным работы [9], первая из них обусловлена взаимодействием гидроксильной группы с двумя атомами циркония и одним – кремния (OH–ZrZrSi), а вторая – с двумя атомами циркония и вакансией (OH–ZrZr□). В спектрах цирконов Сухоложского района указанные линии прослеживаются лишь эпизодически и обладают слабой интенсивностью (рис. 1, *a*). Спектры большинства цирконов характеризуются «размытой» полосой поглощения с максимумом около 3400 см^{-1} , связанной с фазовой примесью молекулярной H_2O (рис. 1, *b*). Её интегральная интенсивность, согласно закону светопоглощения, прямо пропорциональна концентрации адсорбированной воды в цирконе. Можно предположить, что структурные примеси OH-групп, сингенетичных циркону, отражают насыщенность флюидов H_2O в среде его кристаллизации. По сравнению с этим молекулярная вода в адсорбированной форме, по-видимому, захватывалась кристаллом в процессе относительно низкотемпературных гидротермальных изменений циркона.

Таким образом, к наиболее информативным ИК-спектрометрическим свойствам циркона можно отнести его структурное совершенство, определяющее число и чёткость характеристических полос поглощения, а также относительное содержание в нём структурных гидроксильных групп и воды.

Цирконы Сухоложского рудного поля

Метод ИК-микроскопии уже применялся нами при изучении типоморфных свойств цирконов из месторождений Сухоложского рудного узла [7]. Было установлено значительное разнообразие цирконов, проявляющееся в спектральной области 1780–1950 см⁻¹ и обусловленное различной степенью их структурного совершенства. По этому признаку выделено четыре типа кристаллов: с весьма совершенной (Zr₄), совершенной (Zr₃), несовершенной (Zr₂) и аморфной (Zr₁) структурой. Новые данные позволяют судить о генезисе выделенных разновидностей циркона.

Среди изученных цирконов Сухоложского рудного поля распространены бесцветные, желтоватые, розоватые, ярко-розовые и бурые хорошо огранённые коротко- и длиннопризматические кристаллы. Реже встречаются шарообразные и эллипсоидные зёрна, которые преимущественно обладают розовато-дымчатой и розовой окраской. По внешнему облику, спектральным характеристикам, изотопному возрасту и типу внутреннего строения кристаллов среди них можно выделить четыре генерации (рис. 2).

«Терригенные» цирконы преимущественно представлены в различной степени окатанными (или растворёнными, оплавленными) кристаллами и их обломками, часто имеющими розоватую и бурую окраску. Структура в подавляющем большинстве случаев несовершенная, реже – аморфная (Zr₁₊₂). По U-Pb возрасту выделяются две группы кристаллов: архей–ранний протерозой (2890–2200 млн лет) и ранний протерозой (2200–1600 млн лет). Эта разновидность циркона относится к «фоновому» детриту и распространена повсеместно. Основными источниками циркона, вероятно, служили породы архейского фундамента Нечерского и Тонодского поднятий, а также гранитоиды Чуйско-Нечерского комплекса [3].

«Плутоногенные» цирконы обнаружены в большом количестве, но только в одной пробе, отобранной вблизи гранитов Константиновского штока. Цирконы представлены идиоморфными длиннопризматическими кристаллами, возраст которых заключён в интервале

300–350 млн лет и соответствует возрасту гранитов [5]. Практически все цирконы являются метамиктными и обладают аморфной структурой (Zr₁).

«Вулканогенные» цирконы образуют хорошо сформированные зональные кристаллы с совершенной структурой (Zr₃). Возраст цирконов этого типа близок к времени седиментации (600–700 млн лет). Данный факт был установлен ранее и послужил основанием для вывода о существовании синхронных осадконакоплению проявлений вулканизма [11].

«Метасоматические» цирконы представлены идиоморфными кристаллами с зональным внутренним строением и максимальной степенью структурной упорядоченности (структура весьма совершенная, Zr₄). По времени кристаллизации (300–320 млн лет) цирконы значительно моложе пород хомолхинской свиты, из которых они были выделены, что однозначно свидетельствует о метасоматическом происхождении минерала. Предшествующими исследователями на детритовых цирконах из руд месторождения Сухой Лог были обнаружены микронные гидротермальные каймы [8]. Полученные нами данные указывают на более интенсивный и длительный рост (регенерацию?) кристаллов циркона во время герцинской гидротермально-метасоматической деятельности.

Важно отметить, что перечисленные разновидности циркона чётко различаются экспресс-методом ИК-микроскопии в процессе рядового минералогического анализа шлиховых проб. Это позволяет надёжно и статистически достоверно охарактеризовать основные закономерности распространения разнотипных цирконов на изученной площади (рис. 3).

Как видно на рисунке, наблюдается отчётливо повышенная концентрация «вулканогенного» циркона в шлихах, отмытых на площади Сухоложского рудного поля. На удалении от него отмечаются только редкие и единичные кристаллы данной разновидности. Принимая во внимание гидротермально-осадочный характер развитой в рудном поле сульфидной минерализации [10], повышенная доля

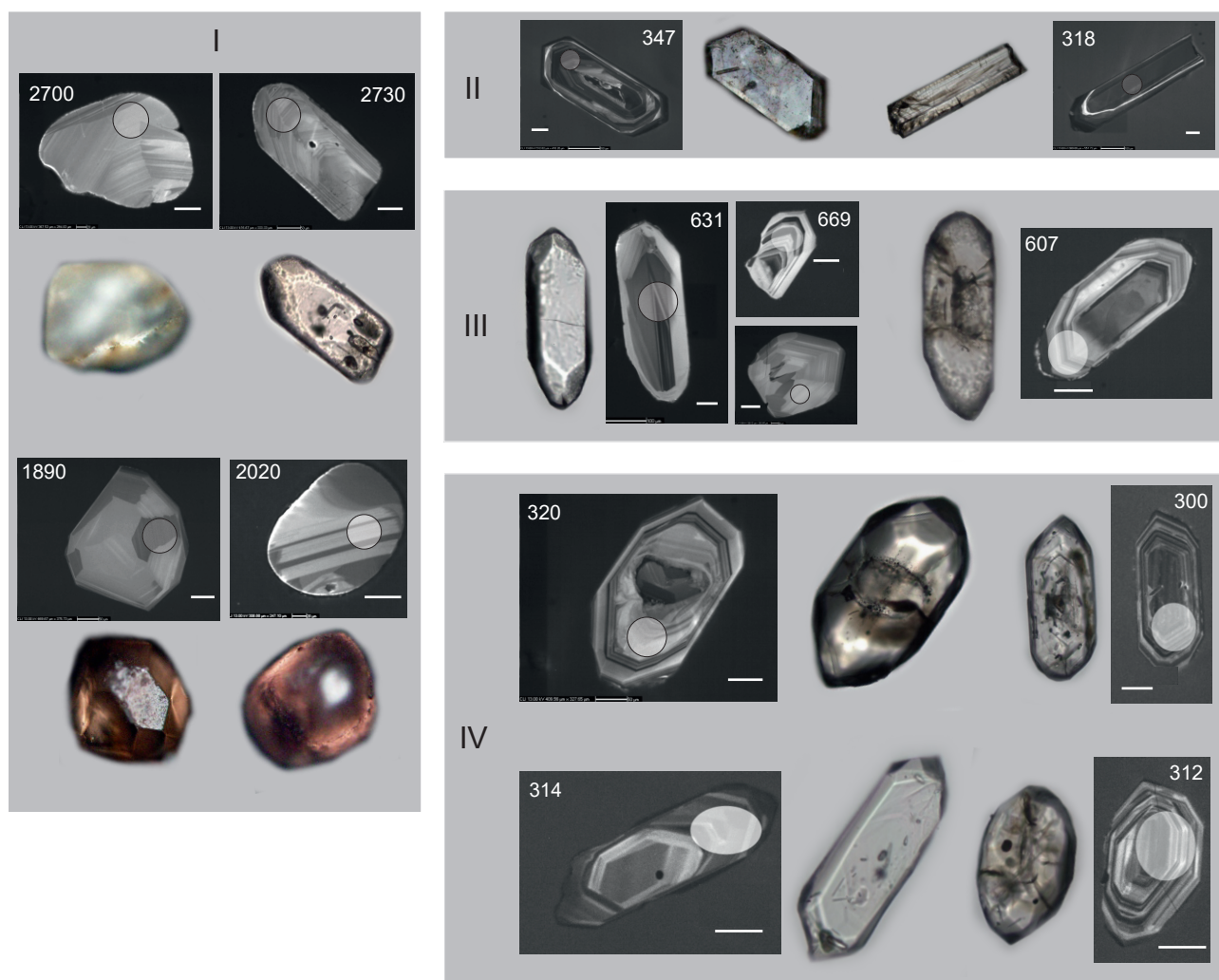


Рис. 2. Типы цирконов в протолочных и шлиховых пробах Сухоложского рудного поля:

I – в различной степени окатанные кристаллы и их фрагменты, структура несовершенная (повсеместно распространённый детрит архейского и протерозойского возраста); II – кристаллы из палеозойских гранитоидов (?), структура несовершенная, аморфное состояние; III – идиоморфные кристаллы, структура совершенная, возраст (600–700 млн лет) близок к времени осадконакопления. Выделены из пород и шлихов в сухоложском рудном поле; IV – метасоматические кристаллы с весьма совершенной структурой из пород и руд месторождения Сухой Лог, Сухоложской россыпи, шлиховых ореолов. Фото в проходящем свете и в катодных лучах. Показаны точки анализа и полученные значения U-Pb возраста (млн лет). Масштабная линейка 50 мкм

Fig. 2. Zircon types in heavy mineral concentrates of the crushed rock and alluvial samples within the Sukhoi Log ore field:

I – variably rounded crystals and their fragments, the structure is imperfect (ubiquitous detritus of Archean and Proterozoic age); II – crystals from Paleozoic granitoids (?), the structure is imperfect, amorphous state; III – euhedral crystals, the structure is perfect, the age (600–700 Ma) is close to the time of sedimentation. Extracted from rocks and alluvial concentrates taken within the Sukhoi Log ore field; IV – metasedimentary crystals with a very perfect structure from rocks and ores of the Sukhoi Log deposit, from the Sukhoi Log placer, and from alluvial heavy mineral concentrate (HMC) halos. Photographed in transmitted light and cathode rays. The analysis points and obtained U-Pb age values (Ma) are shown. Scale bar 50 μ m

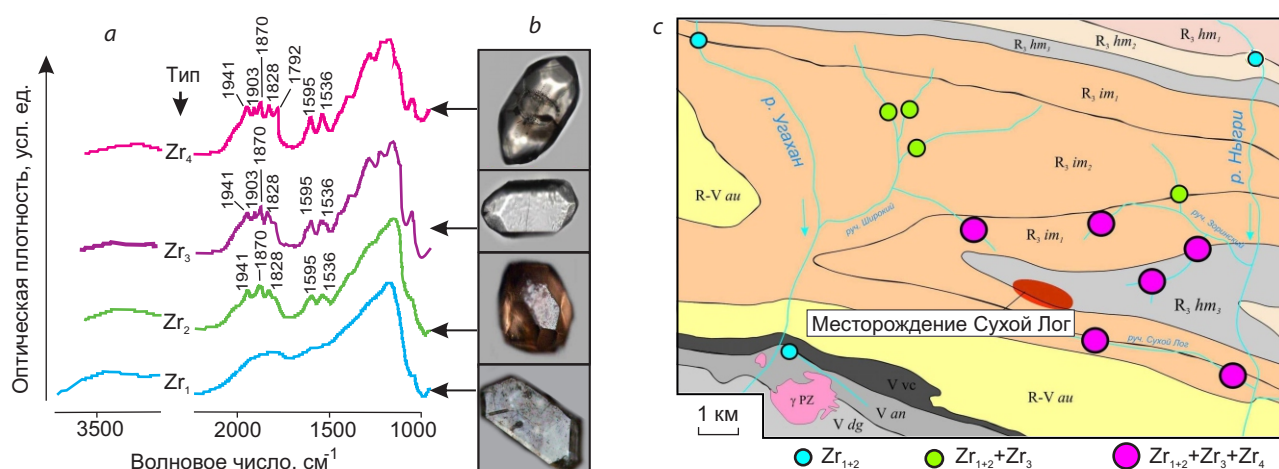


Рис. 3. Пример использования ИК-спектрометрического показателя совершенства структуры кристаллов циркона при шлихоминералогических поисках золоторудных месторождений сухоложского типа:
a – типизация цирконов по данным ИК-микроскопии; *b* – внешний облик кристаллов размером 100–200 мкм; *c* – распределение цирконов различного типа в современном аллювии на площади Сухоложского рудного поля. Геологическая основа по [2]

Fig. 3. An example of application of the IR spectrometric index of the zircon crystal structure perfection to the HMC-mineralogical prospecting for Sukhoi Log type gold deposits:

a – zircon typification based on IR microscopy data; *b* – appearance of the crystals 100–200 μm in size; *c* – distribution of zircons of various types in recent alluvium within the Sukhoi Log ore field. Geological basis after [2]

вулканогенного материала в рудовмещающих породах, по-видимому, не случайна.

«Метасоматические» цирконы с весьма совершенной структурой на площади распространены значительно более локально. Они обнаружены исключительно в аллювии ручьёв, размывающих сухоложское месторождение. Поскольку аналогичные цирконы были установлены в рудах Сухого Лога, источник выявленных шлиховых ореолов определяется однозначно.

Цирконы месторождения Наталка

Результаты исследования цирконов на месторождении Наталка (Магаданская область) подтвердили информативность отмеченных выше типоморфных признаков. Цирконы извлекали из руд месторождения Наталка (представительные технологические пробы, 60 кристаллов), а также из «фоновых» вмещающих пород, пробы которых были отобраны на удалении 1–3 км от месторождения (60 кристаллов).

Установлено, что по комбинациям линий в области 1780–1950 см⁻¹ около 20 % цирконов в рудах составляет циркон с весьма совершенной структурой (Zr₄), практически отсутствующий в «фоновых» породах. По аналогии с цирконами Сухого Лога можно предполагать, что ведущим процессом, обусловившим высокое структурное совершенство кристаллов циркона в породах месторождения Наталка, является околорудный метасоматизм.

Изоотнопно-геохронологические исследования цирконов показали, что только кристаллы Zr₄ из руд характеризуются резкой нарушенностью (дискордантностью) U-Pb системы, т. е. несут признаки метасоматического воздействия. При этом возраст нарушения системы, определённый по пересечению дискордии с конкордией (около 138 млн лет), оказался близким к времени рудообразования (по [1]).

Таким образом, структурное совершенство циркона может отражать условия роста кристалла, особенности его химического состава и возраст. Данный диагностический критерий эффективен для площадей с множественными генетически различными источниками цирконов, в частности – для ареалов развития потенциально золотоносных углеродисто-терригенных толщ.

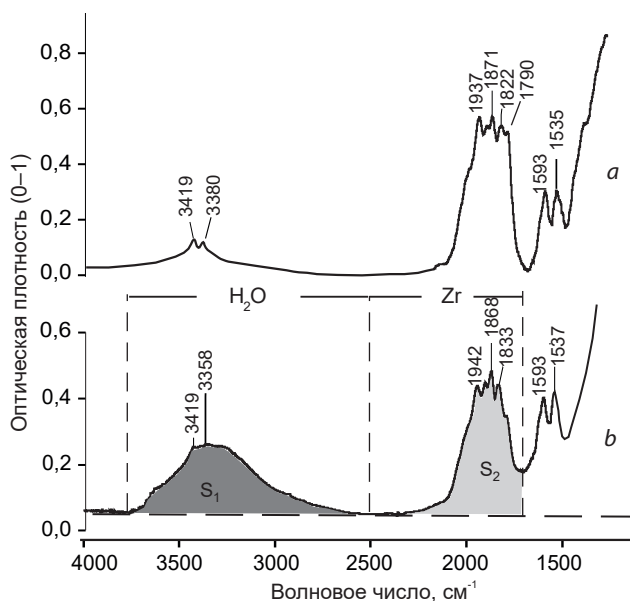


Рис. 4. Характерные ИК-спектры кристаллов циркона Мечивеевской площади с весьма совершенной (а) и совершенной (b) структурой

Fig. 4. Characteristic IR spectra of zircon crystals from the Mechiveem area with (a) very perfect structure and (b) perfect structure

Цирконы Мечивеевской площади

На Мечивеевской перспективной площади (Охотско-Чукотский вулcano-плутонический пояс) проводились поиски золото-молибден-меднопорфирового и сопряжённого оруденения с использованием шлихо-минералогического картирования. С целью апробации метода ИК-микроскопии в обстановках развития относительно молодых вулканогенных и интрузивных формаций из 10 шлихов были в случайном порядке извлечены и проанализированы под ИК-Фурье микроскопом цирконы (по 10 кристаллов в каждой пробе).

Результаты показали, что спектры всех изученных цирконов достаточно однотипны и свидетельствуют о высоком структурном совершенстве кристаллов. Это проявляется в чёткой структуре полос собственных колебаний циркона в диапазоне 1780–1950 см⁻¹. В этом интервале во всех ИК-спектрах наблюдаются четыре (Zr₃) или пять (Zr₄) спектральных линий (рис. 4), тогда как метамиктные и существенно разупорядоченные разности сре-

ди исследованных образцов не встречаются. Иначе говоря, по степени структурного совершенства значимых систематических отличий между цирконами из разных проб не обнаружено.

Общей особенностью большинства проанализированных образцов, отличающей их от наиболее типичных цирконов Сухого Лога, служит наличие в них структурных ОН-групп, проявляющихся в виде линий около 3380 и 3420 см⁻¹ (рис. 4).

Наиболее существенные отличия между изученными цирконами наблюдаются по относительному суммарному содержанию воды, находящейся, вероятно, в механических повреждениях кристалла, в составе газовой-жидких включений, во вторичных минералах, развивающихся по циркону, и т. п. Вода проявляется в спектрах в форме широкой диффузной полосы в диапазоне 2500–3800 см⁻¹, интенсивность которой сильно варьирует. Относительная интенсивность данной полосы, согласно закону светопоглощения, отражает содержание воды в минерале. Для количественной оценки концентрации воды в цирконе можно использовать отношение площади пика поглощения, обусловленного примесью воды (S₁), к площади пика собственного поглощения анализируемого кристалла (S₂).

Определение значений S₁ и S₂ осуществлялось в программе OMNIC с помощью специального инструмента измерения площади пика (Peak area tool). Значение S₁/S₂ соответствует относительному содержанию воды в кристалле циркона (xH₂O), выраженному в условных единицах. Результаты расчётов представлены в таблице и в графическом виде отражены на рис. 5.

Как видно из таблицы и рис. 5, цирконы с высоким относительным содержанием воды закономерно распространены на участке золоторудного рудопроявления Быстрое, где выявлены поля развития гидрослюдисто-каолинит-алунитовых аргиллизитов и наиболее широкие ореолы шлихового золота.

Полученные данные свидетельствуют о том, что концентрация воды в цирконе определяется интенсивностью наложенных гидротер-

Таблица. Относительное содержание воды в цирконах из шлиховых проб Мечивеевской площади по данным ИК-микроскопии

Table. Relative water content in zircons from the Metchiveem area from alluvial HMC samples according to IR microscopy data

Номер шлиха	Относительное содержание H ₂ O в цирконах (XH ₂ O)			Доля цирконов с XH ₂ O > 1, %
	от	до	среднее	
Участок «ручей Рыжий»				
20436	0,1	1,4	0,6	10
20234	0,1	2,9	0,8	20
20488	0,2	1,3	0,6	10
20215	0,1	2,2	0,9	40
ШТ007	0,3	1,3	0,8	20
Участок рудопроявления Быстрое				
20095	0,1	2,5	1,3	60
20619	0,1	2,2	1,0	40
ШШ2	0,1	2,2	1,0	60
20258	0,3	1,8	1,0	50
20256	0,4	2,7	1,1	40

мальных преобразований минерала и может служить отличительным признаком цирконов из околорудных метасоматитов.

Выводы

Рассмотренные примеры свидетельствуют о перспективности использования ИК-микроскопии для анализа циркона при прогнозе и поисках месторождений цветных и благородных металлов. Метод эффективен при экспресс-диагностике этого минерала в шлиховых пробах и определении его типоморфных признаков для разбраковки шлиховых ореолов при минералогическом картировании. Присутствие индикаторных цирконов в шлихах (по данным ИК-спектроскопии) может служить эффективным критерием выявления потенциальных рудных полей и локализации поисковых участков.

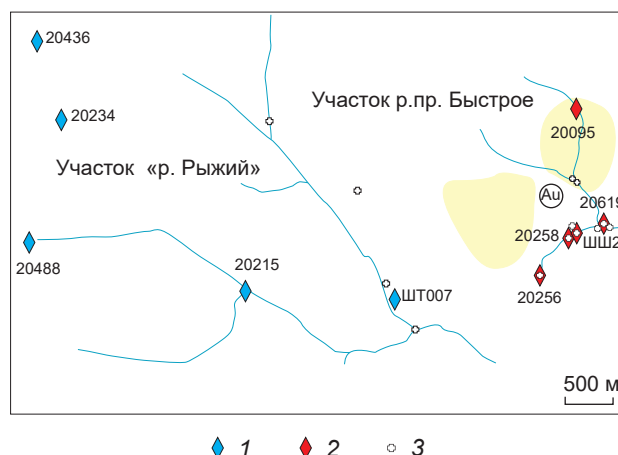


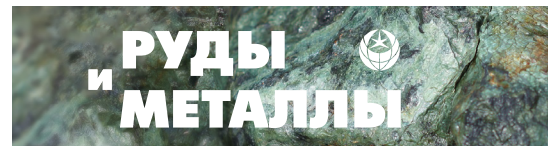
Рис. 5. Распределение цирконов различного типа на Мечивеевской площади:

среднее относительное содержание воды (XH₂O) в цирконах из шлиховых проб: 1 – < 1 у. е., 2 – ≥ 1 у. е.; 3 – шлиховые ореолы золота. Жёлтым выделены поля развития аргиллизитов. Названия участков и номера шлиховых проб те же, что и в таблице; Au – рудопроявление Быстрое

Fig. 5. Distribution of zircons of different types in the Metchiveem area:

average relative water content (XH₂O) in the zircons from alluvial HMC samples: 1 – < 1 c.u., 2 – ≥ 1 c.u.; 3 – alluvial HMC gold halos; yellow – areas of argillizites; see sample numbers in the table; Au – Bystroe ore occurrence

Важной типоморфной характеристикой циркона, определяемой с помощью ИК-микроскопа, является степень структурного совершенства кристаллов. Этот диагностический признак зависит от химического состава, возраста, условий кристаллизации минерала и может использоваться в качестве критерия для выделения его генераций на поисковых площадях с множественными источниками циркона, например в ареалах развития потенциально золотоносных углеродисто-терригенных комплексов. Установлено, что помимо «детритового» циркона на золоторудных объектах в углеродисто-терригенных толщах присутствует метасоматический новообразованный циркон, возраст которого совпадает со временем проявления основных этапов рудообразования.



Одним из показателей интенсивности гидротермальных преобразований циркона служит относительное содержание адсорбированной воды в кристалле, которое может быть количественно оценено по его ИК-спектрам.

Как показано на примере Мечивеевской площади, данный признак наиболее эффективен при поисках в районах развития относительно молодых вулканогенных и интрузивных формаций.

Список литературы

1. Гончаров В. И., Ворошин С. В., Сидоров В. А. Наталкинское золоторудное месторождение. – Магадан : СВКНИИ ДВО РАН, 2002. – 250 с.
2. Иванов А. И. Золото Байкало-Патома (геология, оруденение, перспективы). – М. : ЦНИГРИ, 2014. – 215 с.
3. Иванов А. И., Лившиц В. И., Перевалов О. В. и др. Докембрий Патомского нагорья. – М. : Недра, 1995. – 352 с.
4. Каулина Т. В. Образование и преобразование циркона в полиметаморфических комплексах. – Апатиты : Изд-во Кольского научного центра РАН, 2010. – 144 с.
5. Рыцк Е. Ю., Толмачева Е. В., Великославинский С. Д., Кузнецов А. Б., Родионов Н. В., Андреев А. А., Федосеенко А. М. Результаты исследования циркона (SIMS) из гранитоидов Константиновского штока (район золоторудного месторождения Сухой Лог): возраст, источники и геологические следствия // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2021. – Т. 496, № 2. – С. 169–175.
6. Хачатрян Г. К., Анашкина Н. Е. Применение ИК-Фурье микроскопии для исследования индикаторных минералов кимберлитов при шлихо-минералогических поисках месторождений алмаза // Руды и металлы. – 2024. – № 4. – С. 78–90.
7. Хачатрян Г. К., Кряжев С. Г. Методика анализа породообразующих и аксессуарных минералов рудных месторождений с использованием ИК-Фурье микроскопа // Руды и металлы. – 2010. – № 5. – С. 64–73.
8. Юдовская М. А., Дистлер В. В., Родионов Н. В. и др. Соотношение процессов метаморфизма и рудообразования на золотом черносланцевом месторождении Сухой Лог по данным U-Th-Pb-изотопного SHRIMP-датирования аксессуарных минералов // Геология рудных месторождений. – 2011. – Т. 53, № 1. – С. 32–64.
9. Beran A., Libowitzky E. Water in Natural Mantle Minerals II: Olivine, Garnet and Accessory Minerals // Reviews in Mineralogy & Geochemistry. – 2006. – V. 62. – P. 169–191.
10. Large R., Maslennikov V., Robert F., Danyushevsky L., Chang Z. Multistage Sedimentary and Metamorphic Origin of Pyrite and Gold in the Giant Sukhoi Log Deposit, Lena Gold Province, Russia // Economic Geology. – 2007. – V. 102. – P. 1233–1267.
11. Meffre S., Large R., Scott R. et al. Age and pyrite Pb-isotopic composition of the giant Sukhoi Log sediment-hosted gold deposit, Russia // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2008. – V. 72. – P. 2377–2391.
12. Zhang M., Salje E., Ewing R. C. Infrared spectra of Si–O overtones, hydrous species, and U ions in metamict zircon: radiation damage and recrystallization // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2002. – V. 14. – P. 3333–3352.

References

1. Goncharov V. I., Voroshin S. V., Sidorov V. A. Natalkinskoe zolotorudnoe mestorozhdenie [Natalka gold deposit], Magadan, SVKNII FEB RAS Publ., 2002, 250 p.
2. Ivanov A. I. Zoloto Baikalo-Patoma (geologiya, orudenenie, perspektivy) [Baikal-Patom gold (geology, mineralization, prospects)], Moscow, TsNIGRI Publ., 2014, 215 p.
3. Ivanov A. I., Livshits V. I., Perevalov O. V. et al. Dokembrii Patomskogo nagor'ya [Precambrian of the Patom Upland], Moscow, Nedra Publ., 1995, 352 p.
4. Kaulina T. V. Obrazovanie i preobrazovanie tsirkona v polimetamorficheskikh kompleksakh [Formation and transformation of zircon in polymetamorphic complexes], Apatity, Kola Science Center of RAS Publ., 2010, 144 p.
5. Rytsk E. Yu., Tolmacheva E. V., Velikoslavinskii S. D., Kuznetsov A. B., Rodionov N. V., Andreev A. A., Fedoseenko A. M. Rezul'taty issledovaniya tsirko-

- на (SIMS) iz granitoidov Konstantinovskogo shtoka (raion zolotorudnogo mestorozhdeniya Sukhoi Log): vozrast, istochniki i geologicheskie sledstviya [Results of the study of zircon (SIMS) from granitoids of the Konstantinovsky stock (area of the Sukhoi Log gold ore deposit): age, sources and geological consequences], *Doklady Rossiiskoi akademii nauk. Nauki o Zemle* [Reports of the Russian Academy of Sciences. Earth Sciences], 2021, V. 496, No 2, pp. 169–175. (In Russ.)
6. Khachatryan G. K., Anashkina N. E. Primenenie IK-Fur'e mikroskopii dlya issledovaniya indikatornykh mineralov kimberlitov pri shlikho-mineralogicheskikh poiskakh mestorozhdenii almaza [Application of IR Fourier microscopy for the investigation of kimberlite indicator minerals to search for diamond deposits using heavy-mineral concentrate method], *Rudy i metally* [Ores and metals], 2024, No 4, pp. 78–90. (In Russ.)
 7. Khachatryan G. K., Kryazhev S. G. Metodika analiza porodoobrazuyushchikh i aktsessornykh mineralov rudnykh mestorozhdenii s ispol'zovaniem IK-Fur'e mikroskopa [Methodology for analyzing rock-forming and accessory minerals of ore deposits using an IR Fourier microscope], *Rudy i metally* [Ores and metals], 2010, No 5, pp. 64–73. (In Russ.)
 8. Yudovskaya M. A., Distler V. V., Rodionov N. V. et al. Sootnoshenie protsessov metamorfizma i ru-
doobrazovaniya na zolotom chernoslantsevom mestorozhdenii Sukhoi Log po dannym U-Th-Pb-izotopnogo SHRIMP-datirovaniya aktsessornykh mineralov [Relationship between metamorphic and ore formation processes at the Sukhoi Log gold black shale deposit based on U-Th-Pb isotope SHRIMP dating of accessory minerals], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of ore deposits], 2011, V. 53, No 1, pp. 32–64. (In Russ.)
 9. Beran A., Libowitzky E. Water in Natural Mantle Minerals II: Olivine, Garnet and Accessory Minerals, *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 2006, V. 62, pp. 169–191.
 10. Large R., Maslennikov V., Robert F., Danyushevsky L., Chang Z. Multistage Sedimentary and Metamorphic Origin of Pyrite and Gold in the Giant Sukhoi Log Deposit, Lena Gold Province, Russia, *Economic Geology*, 2007, V. 102, pp. 1233–1267.
 11. Meffre S., Large R., Scott R. et al. Age and pyrite Pb-isotopic composition of the giant Sukhoi Log sediment-hosted gold deposit, Russia, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, V. 72, pp. 2377–2391.
 12. Zhang M., Salje E., Ewing R. C. Infrared spectrum of Si–O overtones, hydrous species, and U ions in metamict zircon: radiation damage and recrystallization, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2002, V. 14, pp. 3333–3352.

Хачатрян Галина Карленовна (Khachatryan-g-k@mail.ru)

доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник

Кряжев Сергей Гаврилович

доктор геолого-минералогических наук, начальник отдела

ФГБУ «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов», г. Москва, Россия

Galina Karlenovna Khachatryan

Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher

Sergey Gavrilovich Kryazhev

Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Head of Department

Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals (FSBU TsNIGRI), Moscow, Russia