

ИК-микроскопия как эффективный метод исследования редкоземельных минералов – монацита и ксенотима

На примере изучения монацита и ксенотима из разных месторождений разработана методика идентификации этих минералов под ИК-микроскопом. Выявлены спектральные характеристики монацита и ксенотима, обусловленные содержанием в них изоморфных и фазовых примесей. Полученные данные могут быть использованы при технологическом картировании месторождений редкоземельных элементов, а также в прогнозно-поисковых целях.

Ключевые слова: монацит, ксенотим, фосфаты, редкоземельные элементы, типоморфизм, ИК-Фурье микроскоп, ИК-спектры, волновое число.

ХАЧАТРЯН ГАЛИНА КАРЛЕНОВНА, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, khachatryan_g_k@mail.ru

АНАШКИНА НАТАЛЬЯ ЕВГЕНЬЕВНА, кандидат технических наук, научный сотрудник, anashkina@tsnigri.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центральный научно-исследовательский геолого-разведочный институт цветных и благородных металлов» (ФГБУ «ЦНИГРИ»), г. Москва

IR microscopy as an effective technique for investigation of the rare earth minerals, monazite and xenotime

G. K. KHACHATRYAN, N. E. ANASHIKINA

Federal State Budgetary Institution "Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals" (FSBI "TSNIGRI"), Moscow

Based on studying monazite and xenotime from various ore deposits, a method for identifying these minerals under an IR microscope has been developed. The spectral characteristics of monazite and xenotime have been revealed, determined by their content of isomorphic and phase impurities. The data obtained can be used for technological mapping of deposits of rare earth elements, as well as for the forecasting and prospecting purposes.

Key words: monazite, xenotime, phosphates, rare earth elements, typomorphism, FTIR microscope, IR spectra, wave number.

Монацит и ксенотим – основные природные концентраты и источники редкоземельных элементов, без которых невозможно развитие современной промышленности и новых технологий.

Эти редкоземельные фосфаты являются типичными акцессорными минералами гранитов и щелочных пегматитов, а также встречаются в породах метаморфического и гидротермального генезиса. Вместе с тем концентрирование монацита и ксенотима с образованием крупных скоплений происходит в экзогенных условиях, в россыпях и корях выветривания, что во многом обусловлено исключительной устойчивостью этих минералов к воздействиям внешней среды. Например, монацит и ксенотим принадлежат к числу глав-

ных рудных минералов на таких месторождениях, как Чукуконское (Красноярский край), Томторское (Якутия), которые приурочены к корам выветривания карбонатитов.

Оптимизация исследований руд на месторождениях редкоземельных элементов возможна за счёт новых экспрессных методов диагностики рудных минералов и определения их типоморфных свойств. Одним из таких методов, не требующих специальной подготовки проб, является ИК-микроскопия, позволяющая «in situ» проводить анализ большинства оптически прозрачных минералов и содержащихся в них структурных и фазовых примесей [4]. Особенно актуально применение этого метода при геолого-технологическом

картировании, целью которого являются детальное изучение зональности распределения минералов и их ассоциаций, вариаций характеристик и свойств рудных фаз, выявление технологических типов и сортов в геологических контурах объекта [1]. Инструментальная диагностика с помощью ИК-микроскопа позволяет различать в шлиховых и протолочных пробах визуально похожие друг на друга монацит и ксенотим, а также циркон, касситерит и некоторые другие минералы. Благодаря тому, что в результате исследования зёрна минералов сохраняются в неизменном виде, имеется возможность отобрать образцы монацита и ксенотима для последующего более детального анализа.

Несмотря на перспективность использования ИК-микроскопии при анализе шлиховых проб, спектры индивидуальных зёрен большинства минералов, случайно ориентированных по отношению к источнику излучения, мало изучены. Соответствующие каталоги эталонных спектров минералов в литературе отсутствуют. В связи с этим целью настоящей работы были сравнительное изучение спектров индивидуальных зёрен монацита и ксенотима из разных месторождений и разработка методических приёмов анализа этих минералов под ИК-микроскопом.

Образцы и методика эксперимента. Исследования проводились с помощью ИК-Фурье спектрометра Nicolet 380 и ИК-Фурье микроскопа Centaurus компании THERMO Scientific в диапазоне 650–4000 см⁻¹.

С помощью ИК-микроскопа были изучены отобранные на разных месторождениях мелкие кристаллы и зёрна монацита (8 образцов) и ксенотима (9 образцов) из коллекции отдела минералогии и изотопной геохимии ФГБУ «ЦНИГРИ» (рис. 1). Геологическая привязка изученных образцов, представленных в таблицах 1 и 2, учтена при их нумерации: О – Омчак (Забайкалье), Н – Наталка (Магаданская область), Б – Березовское (Средний Урал), С – Сентачан (Якутия), СЛ и В – соответственно Сухой Лог и Вернинское (Иркутская область).

Предварительно идентификация монацита и ксенотима осуществлялась по ИК-спектрам порошковых препаратов (иммерсионная среда – KBr) на основе электронной библиотеки спектров HR Minerals, входящей в программное обеспечение спектрометра Nicolet 380. Они записывались на том же спектрометре с помощью

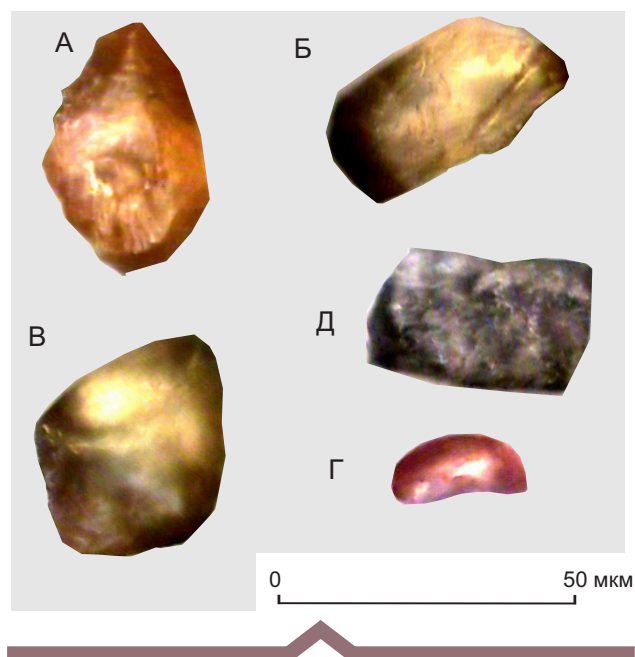


Рис. 1. Внешний вид изученных образцов монацита (А–Г) и ксенотима (Д) под ИК-микроскопом:

месторождения: А–В, Д – Сухой Лог, Г – Омчак

приставки Smart Diffuse Reflectance в области 400–4000 см⁻¹.

Монацит (Ce, La, Nd, ..., Th) PO₄. Состав и структурные особенности. Среди природных фосфатов монацит является одним из наиболее известных и распространённых. Монациты характеризуются переменным составом и содержат практически полный ряд редкоземельных элементов.

В монаците обычно содержится от 3,5 до 10% оксида тория (ThO₂) и 0,1–0,4% оксида урана (U₃O₈). Сумма редкоземельных оксидов (главным образом церия, лантана, неодима), как правило, составляет 55–74%, в том числе иттрий и элементы иттриевой группы (1–3, реже 4–8%), содержание оксида фосфора (P₂O₅) варьирует в пределах 18,4–31,5%.

Несмотря на высокое относительное содержание радиоактивных элементов, структура монацита достаточно устойчива к радиоактивному воздействию. В отличие от циркона монацит редко находится в метамиктном состоянии. В структурах фосфатов, в отличие от большинства силикатов, PO₄-группы присутствуют как самостоятельные компактные группировки атомов в виде тетраэдров, не связанных между собой.

Таблица 1. Волновые числа (см⁻¹) и интерпретация полос поглощения в ИК-спектрах индивидуальных зёрен монацита из разных месторождений

Отнесение полос	Образцы							
	СЛ-1	СЛ-2	СЛ-3	В-1	В-2	О-1	С-1	С-2
ν-PO ₄	<u>966</u>	<u>963</u>	<u>963</u>	<u>961</u>	<u>963</u>	<u>967</u>	<u>965</u>	<u>963</u>
		1032	1031	1000	1000	1023	1031	1002
	<u>1089</u>	<u>1087</u>	<u>1086</u>	<u>1076</u>	<u>1074</u>	<u>1083</u>	<u>1077</u>	<u>1075</u>
	1128	1141	1145	1126			1127	
P-OH, P-O	1230	1238	1205	1225	1208	1235	1201	1222,1236
[NO ₃] ⁻ , δCH ₂ ⁻ , CH ₃ ⁻	1392			1392	1384	1385,1427	1383	1434
δ-OH (H ₂ O)				1635	1633	1626		
ν-PO ₄ (обертонны)	1919	1989		1910,1954			1913,1955	1915
	<u>2032</u>		<u>2034</u>	<u>2016</u>	<u>2021</u>	<u>2027</u>	<u>2022</u>	<u>2012</u>
	2068	2068		2053			2064	2062
	<u>2153</u>	<u>2152</u>	<u>2150</u>	<u>2155</u>	<u>2154</u>	<u>2154</u>	<u>2157</u>	<u>2153</u>
CO ₂	2350	2355	2350	2353	2349	2340	2354	2351
P-H	<u>2386</u>	<u>2377</u>	<u>2382</u>	<u>2385</u>	<u>2389</u>	<u>2360</u>	<u>2381</u>	<u>2383</u>
(OH, NH)?	2745	2736	2731		2719	2719	2737	2750
ν-CH ₂ ⁻ , CH ₃ ⁻	2851,2921					2850,2920	2850,2919	2852,2922
ν-OH (H ₂ O)	3436	3421	3442	3444	3382	3424		3462

Примечание. Подчёркиванием выделены характеристические полосы поглощения, по которым проводится идентификация монацита под ИК-микроскопом; δ и ν – соответственно деформационные и валентные колебания.

Таблица 2. Волновые числа (см⁻¹) и интерпретация полос поглощения в ИК-спектрах индивидуальных зёрен ксенотима из разных месторождений

Отнесение полос	Образцы								
	В-3	В-4	В-5	В-6	СЛ-4	СЛ-5	Н-1	Б-1	Б-2
PO ₄ (обертонны)	<u>1517</u>	<u>1518</u>	<u>1518</u>	<u>1519</u>	<u>1518</u>	<u>1520</u>	<u>1519</u>	<u>1518</u>	<u>1523</u>
	<u>1555</u>	<u>1559</u>	<u>1561</u>	<u>1560</u>	<u>1552</u>	<u>1552</u>	<u>1562</u>	<u>1560</u>	<u>1563</u>
	<u>1662</u>	<u>1665</u>	<u>1663</u>	<u>1665</u>	<u>1665</u>	<u>1664</u>	<u>1664</u>	<u>1664</u>	<u>1655</u>
	/1689/								
		/1798/							
	1987	1991	1991	1991	1990		1989	/1989/	
	2029	2010	<u>2005</u>	2030	2017	<u>2022</u>	2021	2029	2011
	<u>2111</u>	<u>2131</u>	<u>2113</u>	<u>2113</u>	<u>2116</u>	<u>2121</u>	<u>2114</u>	<u>2107</u>	<u>2113</u>
					2254, 2288				
CO ₂		2351		2334, 2356	2334, 2359	2348	2358		
P-H						2388			
ν-CH ₂ ⁻ , CH ₃ ⁻						2855, 2928		2885, 2925	
H ₂ O	3458	3477	3457			3468	3472	3461	3439
OH ⁻		3517	3516	3517	3519		3515	3516	

Примечание. Подчёркиванием выделены характеристические полосы поглощения, по которым проводится идентификация ксенотима под ИК-микроскопом; в косых скобках – малоинтенсивные линии, ν – валентные колебания.

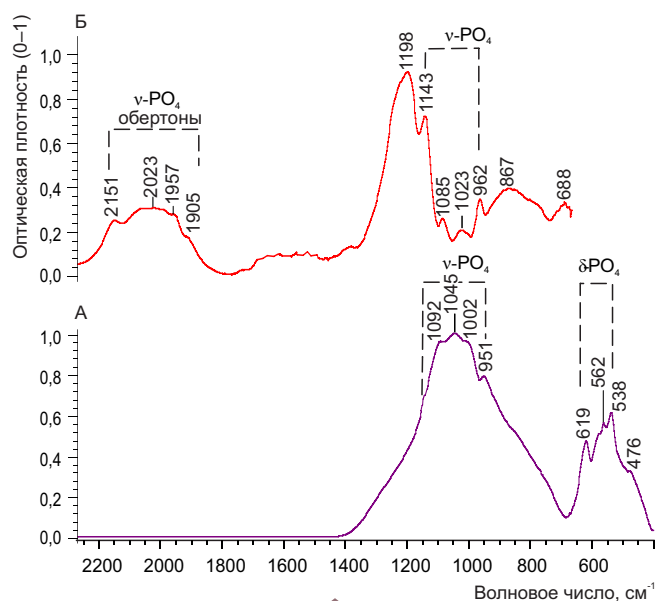


Рис. 2. ИК-Фурье спектры монацита: эталонный «порошковый» (А) и индивидуального зерна, полученный под ИК-микроскопом (Б). Эталонный спектр заимствован из электронной библиотеки HR-Minerals:

v – валентные колебания, δ – деформационные колебания

Группа монацита объединяет ортофосфаты, содержащие лёгкие и относительно более крупные катионы редкоземельных (TR) элементов. Эти соединения кристаллизуются в моноклинной сингонии. В структурном типе монацита изолированные PO_4 -тетраэдры связаны между собой девятивершинниками TRO_9 , которые могут служить позицией для изоморфного внедрения актиноидов.

ИК-спектры. Согласно данным работы [3], спектральные линии безводных фосфатов в области 410–490 cm^{-1} связаны с деформационными симметричными (δ_s) колебаниями $[PO_4]^{3-}$ -тетраэдра, а в области 510–670 cm^{-1} – соответственно с деформационными асимметричными (δ_{as}). Валентные (v) колебания $[PO_4]^{3-}$ -тетраэдра проявляются в диапазонах 930–990 cm^{-1} (v_s) и 975–1140 cm^{-1} (v_{as}). Так, в «порошковом» спектре монацита (рис. 2, А) присутствуют четыре характерные линии ~ 476, 538, 562 и 619 cm^{-1} и четыре линии около 951, 1002, 1045 и 1092 cm^{-1} , относимые соответственно к деформационным и валентным колебаниям P-O связей в искажённых $[PO_4]^{3-}$ -тетраэдрах.

В области 3460 cm^{-1} (не показана на рис. 2, А) проявляются валентные колебания OH-групп в

составе молекул воды, адсорбированной минералом [6].

Хотя спектры индивидуальных зёрен монацита отличаются от «порошковых», система линий фосфат-иона в области 900–1100 cm^{-1} присутствует и в тех, и в других (см. рис. 2, А, Б). При этом соответствующие полосы поглощения существенно отличаются по интенсивности. Характерной особенностью спектров зёрен монацита, полученных под ИК-микроскопом, является система полос поглощения в области 1900–2200 cm^{-1} , которые представляют собой обертоны валентных колебаний фосфат-иона.

Диагностика под ИК-микроскопом. Полосы поглощения в спектрах индивидуальных зёрен монацита из разных месторождений приведены на рис. 3 и в табл. 1. Эти спектры, полученные под ИК-микроскопом, имеют общие черты (диагностические признаки) и индивидуальные особенности. Общие черты спектров – полосы поглощения фосфат-аниона в области 900–1100 cm^{-1} и их обертоны в области 1900–2200 cm^{-1} . Кроме них во всех изученных ИК-спектрах монацита неизменно присутствует полоса поглощения малой

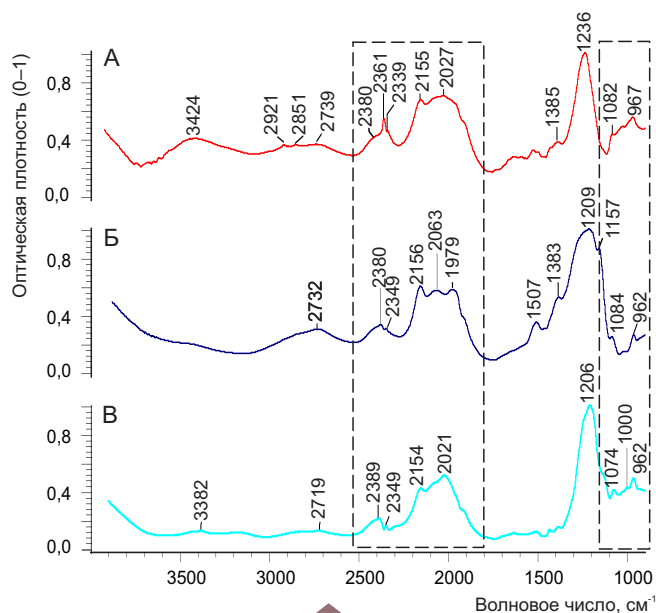


Рис. 3. ИК-Фурье спектры монацита золоторудных месторождений Омчак (А), Сухой Лог (Б), Вернинское (В) под ИК-микроскопом:

штриховыми линиями ограничены области характеристических линий монацита

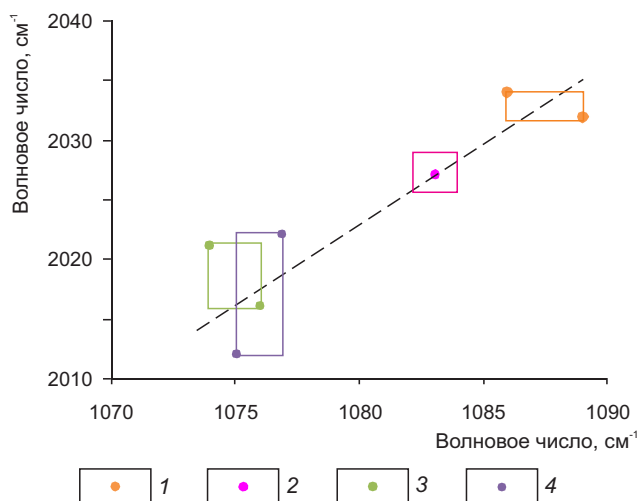


Рис. 4. Волновые числа полос поглощения валентных колебаний PO_4 -тетраэдров ($1070\text{--}1090\text{ см}^{-1}$) и их обертонов ($2010\text{--}2040\text{ см}^{-1}$) в спектрах индивидуальных зёрен монацита из разных месторождений:

1 – Сухой Лог, 2 – Омчак, 3 – Вернинское, 4 – Сентачан

интенсивности $\sim 2380\text{--}2390\text{ см}^{-1}$, которая, вероятно, обусловлена валентными колебаниями P-H [2]. Самая интенсивная полоса поглощения в спектрах зёрен монацита располагается в интервале $1200\text{--}1250\text{ см}^{-1}$. Значение этой линии для диагностики монацита под ИК-микроскопом пока не выяснено. Не исключено, что линия около 1235 см^{-1} может относиться к валентным колебаниям P-O в составе POOH или P=O-групп [2].

В монацитах часто присутствуют разнообразные флюидные включения, отражающие условия и состав среды его кристаллизации, содержание которых меняется от образца к образцу. Эти примеси проявляются в виде «дополнительных» линий в ИК-спектрах монацита под ИК-микроскопом. Они связаны с наличием фазовых примесей воды (валентные и деформационные колебания O-H связи в областях $2550\text{--}3650$ и $\sim 1630\text{ см}^{-1}$, соответственно), уголекислоты ($\sim 2350\text{ см}^{-1}$) и углеводородов (колебания CH_2 - и CH_3 -групп: ~ 2850 , ~ 2920 , ~ 1380 , $\sim 1430\text{ см}^{-1}$). Согласно данным [6], полоса поглощения около 1380 см^{-1} также может быть связана с примесью $[\text{NO}_3]^-$ -аниона.

В спектрах индивидуальных зёрен монацита из разных месторождений (рис. 4, табл. 1) волновые числа полос поглощения собственных колебаний его кристаллической решётки значимо

варьируют. При этом намечаются систематические отличия между спектрами монацита из месторождений Сухой Лог, Омчак, Вернинское и Сентачан по волновым числам валентных колебаний PO_4 -тетраэдров ($1070\text{--}1090\text{ см}^{-1}$) и их обертонов ($2010\text{--}2040\text{ см}^{-1}$). Наиболее вероятно, что это связано с изоморфными замещениями в анионных группах $[\text{PO}_4]^{3-} \rightarrow [\text{SiO}_4]^{4-}$ и другими, а также катионным составом монацитов (разным содержанием в них редкоземельных элементов Ce, La, Nd и др.). Выявленные особенности спектров монацита в дальнейшем необходимо исследовать на более представительном материале. Не исключено, что параметры спектров монацита, обусловленные разнообразными примесями, могут рассматриваться в качестве его типоморфных признаков и использоваться при технологическом картировании месторождений, а также в прогнозно-поисковых целях.

Ксенотим (YPO). Состав и структурные особенности. Иттрий в ксенотиме часто замещается другими редкоземельными элементами (TR), а также Th, U, Zr, Ca, Al, а фосфор – неметаллами (As, Si, S). В структуре ксенотима изолированные тетраэдры PO_4 связаны между собой восьмивершинниками TRO_8 существенно меньшего, чем в монацитах, объёма, что обусловлено эффектом лантаноидного сжатия в ряду редкоземельных элементов. В результате этого структурный тип монацита (моноклинная сингония) закономерно сменяется на родственный ему более высокосимметричный структурный тип ксенотима (тетрагональная сингония). Ксенотим изоструктурен с цирконом, поэтому оба минерала имеют одинаковые формы кристаллов. Подобно монациту структура ксенотима относительно устойчива к радиационному воздействию. В связи с этим метамиктное состояние для ксенотима в отличие от циркона не характерно.

ИК-спектры. «Порошковые» ИК-спектры ксенотима (рис. 5) сходны со спектрами других ортофосфатов [3], но имеют собственные характеристические линии. По сравнению с монацитом спектр ксенотима имеет менее сложную структуру.

Интенсивная полоса поглощения с максимумом около 1007 см^{-1} обусловлена валентными колебаниями PO_4 -тетраэдров, а чёткие пики около 519 и 637 см^{-1} – соответственно деформационными [7]. Спектры зёрен ксенотима под ИК-микроскопом существенно отличаются от «порошковых».

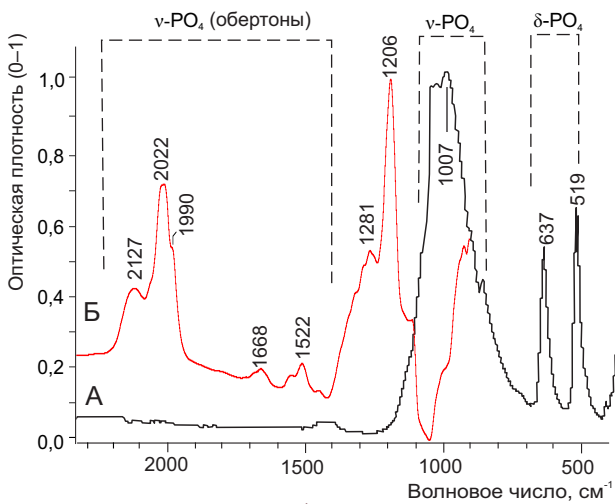


Рис. 5. ИК-Фурье спектры ксенотима: эталонный «порошковый» (А) и индивидуального зерна, полученный под ИК-микроскопом (Б). Эталонный спектр заимствован из работы [5]:

колебания: ν – валентные, δ – деформационные

В области 650–1500 cm^{-1} частотные характеристики спектральных линий и их количество варьируют. В связи с этим воспроизводимой частью спектров ксенотима, полученных под ИК-микроскопом, является диапазон волновых чисел 1500–4000 cm^{-1} . Именно в этом диапазоне находятся спектральные линии, которые могут быть использованы для диагностики минерала. Интерпретация этих линий ИК-поглощения ксенотима проводилась нами на основе сравнения со спектрами близкого к нему по химическому составу монацита и изоструктурного ксенотиму циркона [8]. Так, в интервале 1500–2300 cm^{-1} проявлены обертоны колебаний фосфат-анионов, вблизи 2388 cm^{-1} – валентных Р-Н-групп, а около 3515–3519 cm^{-1} – структурных ОН-групп. Остальные полосы поглощения обусловлены фазовыми примесями двуокси углерода, углеводородов и воды в ксенотиме (см. табл. 2).

Диагностика под ИК-микроскопом. Как было показано выше, диагностировать ксенотим под ИК-микроскопом можно по характеристическим линиям ИК-спектра, обусловленным колебаниями фосфат-аниона. В силу особенностей спектров индивидуальных зёрен минералов по сравнению с «порошковыми» спектрами для диагностики используются обертоны валентных коле-

баний PO_4 -тетраэдров. Помимо них в диапазоне 1500–2300 cm^{-1} имеются другие линии, обусловленные колебаниями в PO_4 -тетраэдрах. Однако данные полосы поглощения проявляются не во всех изученных образцах и, следовательно, не могут рассматриваться в качестве характеристических. Остальные линии, связанные с наличием примесей углекислоты, углеводородов и воды, а также со структурными ОН-группами в спектрах ксенотима, проявляются спорадически. Возможности использования этих характеристик в качестве типоморфных можно будет оценить в процессе дальнейших исследований.

Подводя итог вышеизложенному, сопоставим особенности спектров фосфатов монацита, ксенотима и апатита в области обертонов колебаний PO_4 -тетраэдров (рис. 6). Спектры минералов отличаются по количеству линий, их частотным характеристикам и интенсивности. Спектр апатита содержит максимальное количество чётких линий, среди которых характеристическими являются ~ 1930, ~ 1996, ~ 2083, ~ 2152 cm^{-1} . Эти главные характеристические линии «осложнены» дополнительными менее интенсивными пиками.

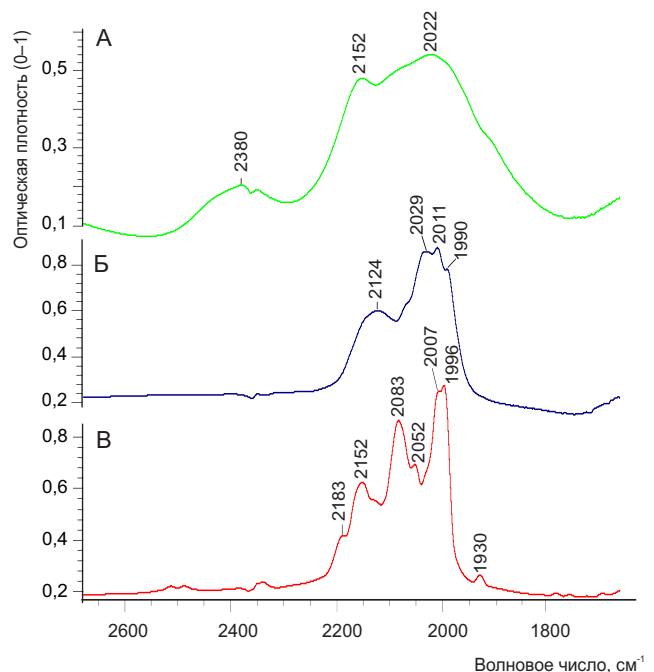


Рис. 6. Сопоставление спектров индивидуальных зёрен монацита (А), ксенотима (Б) и апатита (В), записанных под ИК-микроскопом

Спектр ксенотима в отличие от апатита содержит меньшее число линий, главными из которых являются около 2011 и 2029 см^{-1} , а также около 2124 см^{-1} . Дополнительно к ним диагностику ксенотима рекомендуется проводить по полосам поглощения: 1517–1523, 1552–1563 и 1662–1665 см^{-1} .

В отличие от рассмотренных, ИК-спектр монацита не такой чёткий и содержит широкие («размытые») полосы поглощения, среди которых характеристическими являются максимум поглощения около 2022 см^{-1} , а также линии около 2152 и 2380 см^{-1} .

Заключение. Как показал анализ спектров монацита и ксенотима, каждый из этих минералов может быть идентифицирован под ИК-микроскопом по системам характеристических линий, их количеству, волновому числу и соотношению интенсивностей.

Монацит предлагается определять по системе из трёх «размытых» полос поглощения в интервалах 2010–2040, 2150–2160 и 2360–2390 см^{-1} .

Характеристическими линиями ксенотима являются 2005–2030 и 2107–2131 см^{-1} в сочетании с тремя пиками меньшей интенсивности 1517–1523, 1552–1563, а также 1655–1665 см^{-1} .

Спектры монацитов из разных месторождений отличаются между собой по волновым чис-

лам валентных колебаний PO_4 -тетраэдров (1070–1090 см^{-1}) и их обертонов (2010–2040 см^{-1}). Это связано с изоморфными замещениями ионов в структуре монацита и отражает специфические особенности его химического состава.

Помимо характеристических линий, позволяющих проводить диагностику монацита и ксенотима под ИК-микроскопом, в спектрах этих минералов присутствуют «дополнительные» полосы поглощения, обусловленные наличием фазовых примесей воды, уголекислоты, углеводородов. Содержание этих примесей в редкоземельных фосфатах зависит от состава среды и условий их кристаллизации. Возможность использования этих характеристик в качестве типоморфных можно будет оценить в процессе дальнейших исследований.

Таким образом, ИК-микроскопия является эффективным экспрессным методом, позволяющим идентифицировать монацит и ксенотим в шлиховых и протолочных пробах, а также исследовать типоморфные свойства фосфатов. Всё это может быть использовано при технологическом картировании месторождений редкоземельных элементов, а также в прогнозно-поисковых целях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левченко Е. Н., Ожогина Е. Г. Минералого-технологическое сопровождение в системе геологического изучения недр, добычи и переработки редкометалльного сырья // Разведка и охрана недр. – 2016. – № 11. – С. 43–36.
2. Наканиси К. Инфракрасные спектры и строение органических соединений. – М.: Мир, 1965. – 226 с.
3. Печковский В. В., Мельникова Р. Я., Дзюба Е. Д. [и др.] Атлас инфракрасных спектров фосфатов. Ортофосфаты. – М.: Наука, 1981. – 248 с.
4. 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.
5. Chukanov N. V. Infrared spectra of mineral species : Extended Library. Vol.1. – New York; Berlin : Springer; Verlag, 2014. – 1726 p.
6. Ekthammathat N., Thongtem T., Phuruangrat A., Thongtem S. Facile Hydrothermal Synthesis and Optical Properties of Monoclinic CePO_4 Nanowires with High Aspect Ratio // Hindawi Publishing Corporation Journal of Nanomaterials. – V. 2012. – DOI : <https://doi.org/10.1155/2012/958593>.
7. Yahiaoui Z., Hassairi M. A., Dammak M. Synthesis and Optical Spectroscopy of $\text{YPO}_4:\text{Eu}^{3+}$ Orange-Red Phosphors // Journal of electronic materials. – 2017. – № 46 (8). – DOI: 10.1007/s11664-017-5401-4.
8. Zhang Ming, Saljeand E. K. H., 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. *Levchenko Ye. N., Ozhogina Ye. G.* Mineralogo-tekhnologicheskoye soprovozhdeniye v sisteme geologicheskogo izucheniya nedr, dobychi i pererabotki redkometall'nogo syr'ya [Mineralogical and technological support in the system of geological study of subsoil, mining and processing of rare metal raw materials], *Razvedka i okhrana nedr*, 2016, No. 11, pp. 43–36. (In Russ.)
2. *Nakanisi K.* Infrakrasnyye spektry i stroyeniye organicheskikh soyedineniy [Infrared spectra and structure of organic compounds], Moscow, Mir publ., 1965, 226 p. (In Russ.)
3. *Pechkovskiy V. V., Mel'nikova R. YA., Dzyuba Ye. D.* [et al.] Atlas infrakrasnykh spektrov fosfatov. Ortofosfaty [Atlas of infrared spectra of phosphates. Orthophosphates], Moscow, Nauka publ., 1981, 248 p. (In Russ.)
4. *Khachatryan G. K., Kryazhev S. G.* Metodika analiza porodooobrazuyushchikh i aktsessornykh mineralov rudnykh mestorozhdeniy s ispol'zovaniyem IK-Fur'ye mikroskopa [Methodology for the analysis of 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.)
5. *Chukanov N. V.* Infrared spectra of mineral species : Extended Library, Vol.1, New York; Berlin, Springer; Verlag publ., 2014, 1726 p.
6. *Ekthammathat N., Thongtem T., Phuruangrat A., Thongtem S.* Facile Hydrothermal Synthesis and Optical Properties of Monoclinic CePO₄ Nanowires with High Aspect Ratio, *Hindawi Publishing Corporation Journal of Nanomaterials*, V. 2012, DOI : <https://doi.org/10.1155/2012/958593>.
7. *Yahiaoui Z., Hassairi M. A., Dammak M.* Synthesis and Optical Spectroscopy of YPO₄:Eu³⁺ Orange-Red Phosphors, *Journal of electronic materials*, 2017, No. 46 (8), DOI: 10.1007/s11664-017-5401-4.
8. *Zhang Ming, Saljeand E. K. H., 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, pp. 3333–3352.

Статья поступила в редакцию 17.04.24; одобрена после рецензирования 03.05.24; принята к публикации 03.05.24.
The article was submitted 17.04.24; approved after reviewing 03.05.24; accepted for publication 03.05.24.

Журнал «Отечественная геология» принимает участие в геологических конференциях, совещаниях, съездах в качестве информационного партнёра, освещая на своих страницах важные события отрасли.

Приглашаем к сотрудничеству представителей геологических, горно-геологических, горнодобывающих организаций и предприятий, отраслевых научно-исследовательских, академических и образовательных институтов по вопросам размещения рекламы или издания целевого номера.