

УДК 553.83+54.062

А.С. Бидный¹, И.А. Бакшеев², М.П. Попов³, М.О. Аносова⁴

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА БЕРИЛЛА ИЗ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАЛЬСКОЙ ИЗУМРУДОНОСНОЙ ПОЛОСЫ ПО ДАННЫМ ЛА–ИСП–МС- И ИК-СПЕКТРОСКОПИИ

Кристаллы берилла из разных проявлений Уральской изумрудоносной полосы изучены методами масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и лазерной абляцией (ЛА–ИСП–МС), а также инфракрасной спектроскопии (ИКС). Обнаруженные различия в соотношении содержания Li, Na и Cs позволяют разделить изученные образцы на три генетические группы, связанные с воздействием в разной степени эволюционировавшего флюида. Показано, что отношение Cs/Na находит отражение на ИК-спектрах в области поглощения молекул воды, делая возможным идентификацию берилла посредством ИКС. Кроме того, образцы из наиболее крупного Мариинского (Мальшевского) месторождения выделены среди остальных как по данным химического состава, так и по ИК-характеристикам.

Ключевые слова: берилл, масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой и лазерной абляцией, инфракрасная спектроскопия.

Beryl crystals from various deposit of the Ural emerald belt were studied using laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry (LA–ICP–MS) as well as infrared spectroscopy (IRS). Li, Na and Cs concentration ratios were disclosed to distinguish the samples between three genetic groups associated with fluids evolved to varying degree. It is shown that the Cs/Na ratio is reflected in the IR spectra of absorption of water molecules, making the beryl identification by IRS possible. In addition, the samples from the Urals largest Mariinskoye (Malyshevskoye) deposit are discriminated between the rest both by chemical composition and IR features.

Key words: beryl, laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry, infrared spectroscopy.

Введение. В настоящее время геммологические лаборатории, которые занимаются определением страны происхождения изумрудов, для решения этой задачи используют комплекс методов: измерение твердости, плотности, показателей преломления, исследование химического состава (макро- и микро-элементы) [McManus et al., 2004; Le, 2008], а также оптическая, рамановская [Le, 2008] и инфракрасная спектроскопия. Результаты применения последней детально рассмотрены в работах [Wood, Nassau, 1968; Aines, Rossman, 1984; Aurisicchio et al., 1994; Машковцев и др., 2004]. Существуют попытки применения результатов изучения стабильных изотопов (O, D) воды в структурных каналах [Giuliani et al., 1998; Groat et al., 2008], однако изотопный состав для некоторых месторождений совпал.

Цель наших исследований — определение возможности использовать микроэлементный состав берилла и метод ИК-спектроскопии для выявления характеристик, позволяющих установить географическое положение месторождения на примере месторождений Уральской изумрудоносной полосы (УИП), которые являются единственным в России

источником изумрудов высочайшего качества. Эти месторождения находятся в Свердловской области и локализованы в экзоконтактовых зонах Мурзинского, Аудуйского и Каменского массивов.

Для исследования привлечена собранная нами коллекция кристаллов берилла различного цвета из разных проявлений и месторождений УИП.

Состав бериллов определен с помощью методов ЛА–ИСП–МС (масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой и лазерной абляцией) и электронного микрозонда. Кроме того, в инфракрасных спектрах проанализирован диапазон частот, соответствующих колебаниям молекул H₂O в структурных каналах. Для получения дополнительной информации об устойчивости водных комплексов в структуре проведены термогравиметрические эксперименты с последующим ИК-спектроскопическим исследованием.

Краткая геологическая характеристика месторождений. Уральская изумрудоносная полоса занимает южную часть Свердловской области и простирается на 180 км в меридиональном направлении (рис. 1). Берилловая минерализация на изучаемых объектах

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра минералогии, аспирант, e-mail: alexei.bidny@gmail.com

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра минералогии, доцент, e-mail: bakshchev@geol.msu.ru

³ Институт геологии и геохимии имени акад. А.Н. Заварицкого УрО РАН, ст. науч. с., e-mail: popovm1@yandex.ru

⁴ ГЕОХИ РАН, науч. с., e-mail: masha_anosova@mail.ru

приурочена к апогипербазитовым или апобазитовым слюдитам. Слюдиты залегают вдоль восточных контактов Мурзинского, Адуйского и Каменского позднепалеозойских гранитных массивов, составляющих ядро Мурзинско-Адуйского комплекса, контролируемого глубинным Сусанским разломом на сопряжении контрастных по составу коры тектонических блоков — Мурзинско-Адуйского микроконтинента и Режевского вулканогенного прогиба [Куприянова, 2002].

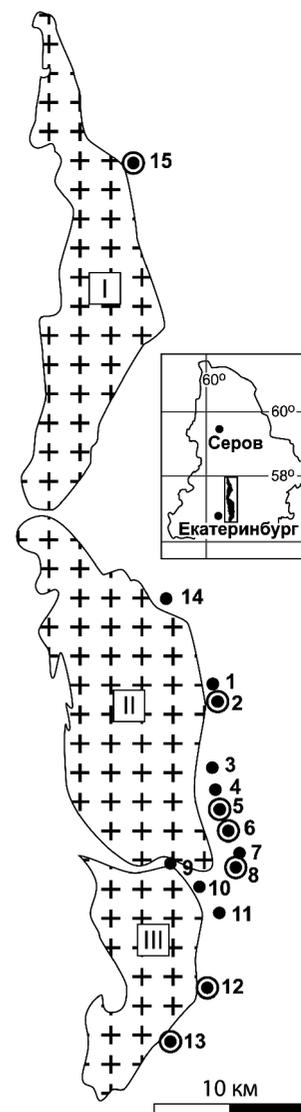
Экзоконтактовая зона представлена метаморфизованными породами основного и ультраосновного состава (амфиболиты, хлоритовые, тальк-актинолитовые и тальковые сланцы). Среди сланцев вдоль контактов с гранитами залегают цепочки будинированных серпентинизированных гипербазитов. Метаморфические породы содержат жилы слюдитов, общее простирание которых совпадает с меридиональным простиранием вмещающих толщ. Кроме того, в самих слюдитах и во вмещающих породах развиты берилл-кварц-мусковит-плагиоклазовые жилы, которые могут занимать секущее положение по отношению к слюдитам или залегают согласно с ними. Берилловая минерализация локализована в обоих типах жил.

Изучены образцы берилла, отобранные из различных месторождений и малых проявлений изумруда УИП. Вмещающими породами для берилла служат кварц-плагиоклазовые пегматоиды среди слюдитовых метасоматитов (Глинское), альбит-микроклиновые пегматоиды с Ве-Ta-Nb оруденением (Квартальное), слюдитовые жилы с бериллом и александритом (Сретенское, Мариинское, Квартальное) и берилл-мусковит-кварц-плагиоклазовые жилы (Мариинское, Каменское, Заречное).

Методы исследования. Определение содержания элементов проводили методом лазерной абляции (LA-ICP-MS) с использованием ICP-MS-спектрометра «Element-XR» и лазерной установки «UP-213» в ГЕОХИ РАН. Диаметр кратера составлял 30–40 мкм, частота импульсов лазера — 4 Гц, время измерения фона — 50 с, время измерения полезного сигнала — 100 с. В качестве калибровочного стандарта использовали стекло NIST-610, в качестве внутреннего — Al, содержание которого измерено с помощью электронного микрозонда. Контроль правильности осуществляли по стеклу ML3B (<http://georem.mpch-mainz.gwdg.de/>). Первичная обработка данных проведена с помощью программного пакета Glitter [Van Achterbergh et al, 2001].

Содержание макроэлементов определено с помощью электронно-зондового микроанализатора «Camebax SX50» на кафедре минералогии геологического факультета МГУ. Ускоряющее напряжение 15 кВ, ток зонда 30 нА, диаметр пучка 2 мкм. В качестве эталона для измерения Si и Al использован синтетический берилл.

Рис. 1. Схематическая карта района Уральской изумрудноносной полосы, на врезке — ее географическое положение. Гранитные массивы: I — Мурзинский, II — Адуйский, III — Каменский. Месторождения и проявления берилла и хризоберилла: 1 — Аульское, 2 — Мариинское, 3 — Первомайское, 4 — им. Крупской, 5 — Сретенское, 6 — Квартальное, 7 — Липовый лог, 8 — Черемшанское, 9 — Островное, 10 — Красноболотное, 11 — Красноармейское, 12 — Каменское, 13 — Заречное, 14 — 71-й км, 15 — Глинское. В кружке — кристаллы берилла из месторождений, рассмотренных в статье



Инфракрасные спектры получены на кафедре минералогии геологического факультета МГУ с помощью инфракрасного Фурье-спектрометра ФСМ 1201 в диапазоне 400–4000 см⁻¹. Образцы для исследований истерты в порошок и анализированы в виде суспензии в вазелиновом масле, чтобы избежать эффектов поляризации и рассеяния. Съемка проходила при комнатной температуре, точность определения частот составила ±1 см⁻¹.

Термогравиметрическое исследование проведено на термической установке «Derivatograph Q-1500D» (Венгрия) на кафедре минералогии геологического факультета МГУ для образца с равным соотношением молекул воды двух типов. Нагревание осуществляли с постоянной скоростью 20 °С/мин до температуры 900, 950 и 1000 °С. Препараты для исследований приготовлены в виде порошков.

Результаты исследования. Исследовано 19 кристаллов берилла из 7 месторождений УИП (табл. 1). Мариинское (Мальшевское) месторождение представлено в коллекции 9 кристаллами. Два из них имеют зеленую окраску, один — голубую, остальные

Таблица 1

Описание образцов берилла

Номер образца	Форма	Размеры, мм		Цвет	Вмещающая порода	Месторождение	Генерация
		длина	ширина				
MR-01	Призматическая	24	8	Белый	Контакт между слюдитом и кварцевой жилой	Мариинское	но
MR-02	Обломки призмы	25	9	Зеленый	Плагноклазовая жила в слюдите	—“—	но
MR-03	Агрегаты призм	58	37	Белый	но	—“—	I
MR-04	Обломок призмы	35	35	—“—	но	—“—	I
MR-06	Призматическая	2	29	Зеленый	но	—“—	II
MR-07	Регенерированная призма	25	25	Белый	но	—“—	III
MR-05	Частично растворенные обломки призм	20	28	—“—	но	—“—	IV
MR-04p	Тонкопризматическая	1	0.4	—“—	но	—“—	IV
MR-08	Обломки и агрегаты призм	50	25	Голубой	но	—“—	IV
CH-01r	Агрегаты призм	15	9	Зеленый	Слюдитовая жила	Черемшанское	но
CH-01c	—“—	15	9	Белый	—“—	—“—	но
GL-01	Призматическая	200	60	Зеленый	Контакт между слюдитом и полевошпатовой жилой	Глинское	но
KM-01	—“—	5	2	—“—	Кварц-плагноклазовая жила	Каменское	но
KV-01	—“—	25	9	—“—	Кварцевая жила	Квартальное	но
KV-02	—“—	1	0.4	—“—	Слюдит в пегматите	—“—	но
SV-01	—“—	до 15	до 6	—“—	Слюдитовая жила	Сретенское	но
SV-02	Обломки и агрегаты призм	4	2	—“—	Кварц-плагноклазовая жила	—“—	но
SV-03	Призматическая	1	0.4	Голубовато-зеленый	—“—	—“—	но
ZR-01	Обломки призмы	25	9	Зеленый	Кварцевая жила	Заречное	но

Примечание. Но — не определялась.

белую. Форма кристаллов в основном призматическая, у некоторых со следами растворения и регенерации. Для 7 кристаллов на основе результатов работы И.И. Куприяновой и С.В. Соколова [1984] выделены генерации.

Черемшанское месторождение представлено агрегатом зональных кристаллов в слюдитовой жиле. Внешняя часть кристаллов зеленая, а ядро белое.

На Глинском проявлении отобран крупный (длина 200 мм) кристалл зеленого берилла из зоны контакта между слюдитовой и пегматоидной жилами. Берилл Каменского проявления также имеет зеленую окраску и встречен непосредственно в кварц-плагноклазовой жиле. Кристаллы зеленого берилла из Квартального месторождения приурочены как к пегматоидной кварц-плагноклазовой жиле, содержащей ксенолиты флогопитов, так и к трещинам внутри слюдитовых пород. На Сретенском (Свердловском) месторождении найдены три типа берилла: два с зеленой окраской в слюдитовой и плагноклазовой жилах, третий тип представлен тонкопризматическим бериллом голубой окраски в плагноклазовой жиле. Проявление Заречное представлено зеленым просвечивающим кристаллом берилла из кварцевой зоны кварц-плагноклазовой жилы.

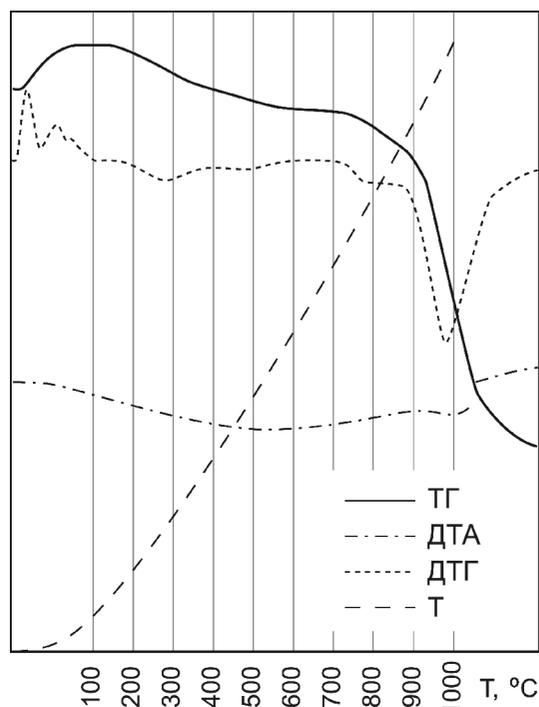


Рис. 2. Результаты термогравиметрического анализа берилла MR-05: ТГ — термогравиметрическая кривая; ДТГ — дифференциально-термогравиметрическая кривая; ДТА — дифференциально-термогравиметрическая кривая; Т — температура

Таблица 2

Химический состав берилла

Компонент	Номер образца										
	GL-01	SV-01	SV-02	KM-01	ZR-01	KV-01	MR-01	MR-02	MR-03	MR-04	MR-05
мас. %											
SiO ₂	67,77	66,31	65,00	64,60	66,67	70,33	66,66	69,18	68,80	68,80	63,58
Al ₂ O ₃	18,67	15,14	14,71	15,33	15,98	18,74	17,73	17,90	18,60	18,06	17,14
BeO _{расч}	16,55	16,00	16,17	16,07	16,07	17,15	15,88	16,02	15,89	15,74	14,35
г/г											
Li	382	398	201	158,9	121	75,6	522	1 064	936	1 262	955
Na	635	13 209	13 650	9 680	9 850	1 600	3 400	7 200	4 190	5 830	3 840
Mg	16,4	12 917	12 550	9 370	10 550	819	1 929	4 450	1 250	2 010	970
P	116,1	77,6	69,4	80,3	92	83,2	133,7	108	93,8	131,9	110,7
Sc	3,53	86,9	116,7	166,6	2,42	78,1	32,5	29,7	1,836	3,33	2,29
Ti	57,4	55,3	74,6	44,8	51,4	41,3	48,8	41	40,6	42,7	46,1
V	0,232	170,5	128,6	221	57,3	54	53,5	79,1	9,87	14,84	7,88
Cr	нпо	945	784	163,5	9,05	3,72	82,6	207	5,23	5,68	нпо
Mn	55,6	32,2	31,8	94,8	23	60,8	40,8	19,49	13,93	44,9	25,1
Fe	2 414	4 300	6 840	9 870	4 900	6 090	3 260	1 569	1 017	1 567	1 009
Co	нпо	1,742	1,467	нпо	2,16	0,537	0,971	1,109	1,102	1,05	0,644
Cu	нпо	1,025	нпо	0,365	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Ga	51,2	16,38	15,86	31	2,77	86,2	38,8	25,4	11,42	31,4	16,11
Rb	72,3	73,6	47,1	55,9	46,2	121	58,9	23,3	10,8	52,5	24,4
Cs	5 920	454	582	185	215	448	550	516	197,1	503	305

Примечание. Нпо — ниже предела обнаружения методом ЛА–ИСП–МС.

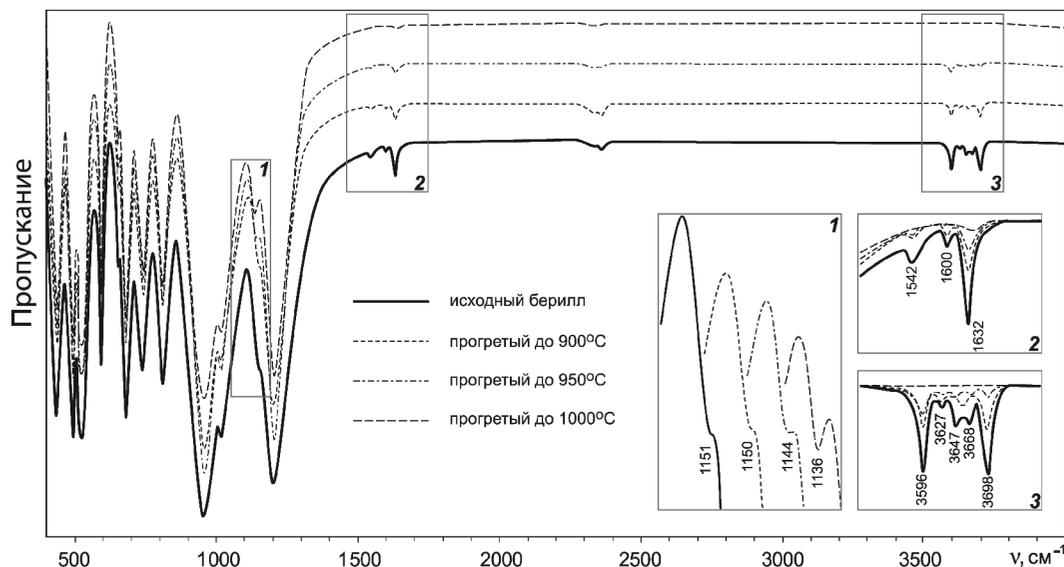
Для 11 кристаллов коллекции получен химический состав, один из них подвергся термогравиметрическому анализу, методом ИК-спектроскопии проанализированы все 19 кристаллов.

Содержание основных компонентов варьирует (мас. %): 64,60–70,33 SiO₂; 14,71–18,74 Al₂O₃; 14,35–17,15 BeO_{расч} (табл. 2). Макропримеси представлены Na, Mg и Fe. Обнаружены микропримеси Li, P, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Co, Cu, Ga, Rb и Cs. Вариации содержания примесей различны для каждого элемента. Наиболее широкий разброс концентрации (г/г) отмечен для Li (75,59–1262,43), Na (634,89–13645,63), Mg

(16,40–12916,98), Sc (1,84–166,59), V (0,23–221,07), Cr (3,72–945,05), Fe (1008,72–9873,96), Rb (10,80–120,98) и Cs (184,58–5921,45).

Термогравиметрический анализ берилла (рис. 2) позволяет получить информацию об устойчивости комплексов, находящихся в структурных каналах, а также установить температуру выхода воды из кристаллов. В работе [Aines, Rossman, 1984] показано, что в ходе отжига до 700 °С происходит обратимый процесс перехода воды обоих типов в незакрепленный газообразный вид. Однако при длительном (2 ч.) удержании температуры 700 °С фиксируется необра-

Рис. 3. ИК-спектры берилла MR-05: исходный и после экспериментов по отжигу. На врезках детализированы диапазоны, в которых наблюдаются изменения. Для наглядности на врезке 1 спектры смещены, а на врезках 2 и 3 совмещены по максимальному пропусканию



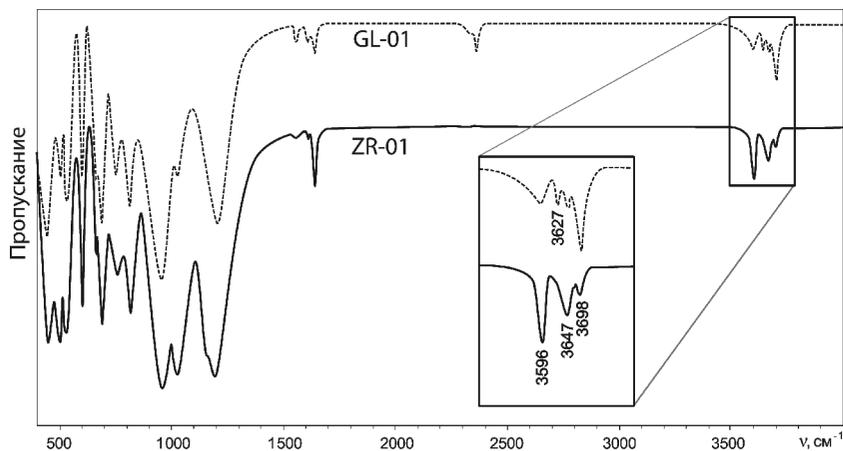


Рис. 4. Спектры инфракрасного поглощения образцов GL-01 и ZR-01. На врезке увеличен фрагмент области поглощения молекул воды 3500–3800 см^{-1}

тимая потеря (до 15% интенсивности линий воды). Нами изучено влияние более высокой температуры на молекулы воды в структурных каналах. В частности, образец MR-05 был прогрет в трех экспериментах до 900, 950 и 1000 °С, после чего температура образца приведена к комнатной. В каждом случае потеря летучего вещества начиналась с 200 °С, что связано с удалением воды из микротрещин, а при более высокой температуре с декрепитацией первичных и вторичных газовой-жидких включений. Начиная с 700 °С на кривой ТГ (рис. 2) отмечается перегиб, указывающий на потерю массы за счет выхода еще одного типа летучего вещества. А около 950 °С кривая ТГ изгибается еще сильнее, что связано с более интенсивной потерей летучих. При таких значениях температуры может происходить высвобождение содержимого структурных каналов, в том числе молекул воды. Чтобы установить, что происходит с молекулами воды при нагревании берилла, мы провели ИК-спектроскопическое исследование.

На спектре образца, не подвергавшегося отжигу, присутствуют линии поглощения молекул воды в диапазонах частоты 1500–1700 и 3500–3800 см^{-1} (рис. 3). На основе работы [Wood, Nassau, 1968] выделяют два типа ориентировки воды в структурных каналах. У молекул I типа ось симметрии 2-го порядка перпендикулярна оси 6-го порядка берилла, а у молекул II типа параллельна ей. В соответствии с упомянутой работой на ИК-спектрах пропускания I типу соответствуют линии 1542, 3555, 3694 см^{-1} , а II типу — линии 1628, 3592 и 3655 см^{-1} .

Для сравнения характеристик спектров изученных образцов рассмотрены обнаруженные в их спектрах линии с максимумами 3698 и 3596 см^{-1} , связанные с I и II типами молекул воды соответственно.

После окончания экспериментов проведено ИК-спектроскопическое исследование (рис. 3), которое показало, что в образце, прогретом при 900 °С, интенсивности линий поглощения воды обоих типов уменьшились. После отжига при 950 °С интенсивность линии поглощения I типа уменьшилась

сильнее, чем линии поглощения II типа. После нагревания до 1000 °С все линии поглощения воды исчезают, что указывает на ее полное удаление из структурных каналов. Похожие свойства молекул воды обнаружены и у синтетических бериллов [Машковцев и др., 2004].

По всей видимости, начиная с 700 °С происходит удаление молекул воды обоих типов из структурных каналов берилла. При этом молекулы I типа выходят из каналов быстрее, будучи менее устойчивыми к воздействию температуры, чем молекулы воды II типа. При 1000 °С из структурных каналов удаляется вся вода.

Кроме диапазона поглощения молекулами воды изменения происходят в каркасной части спектра. С увеличением температуры изменяется положение линии 1151 см^{-1} , достигая 1136 см^{-1} при 1000 °С. Смещение максимума этой линии происходит в направлении низких частот, что означает уменьшение энергии колебаний каркасного комплекса за счет снятия напряжения при удалении молекул и ионов из структурных каналов.

Сопоставление ИК-спектров всех исследованных образцов берилла выявило различия в области поглощения молекулами воды. На рис. 4 представлены спектры инфракрасного поглощения образцов из Глинского (GL-01) и Заречного (ZR-01) проявлений. Отчетливо видно, что у образца берилла ZR-01 линия поглощения воды II типа значительно интенсивнее, чем линия поглощения воды I типа. На спектре берилла GL-01, наоборот, линия воды I типа доминирует над линией воды II типа. Соотношение между интенсивностью линий двух типов различно во всех изученных образцах и детально проанализировано ниже.

Обсуждение результатов. На рис. 5 показана дендрограмма корреляционных связей содержания всех примесей, обнаруженных в изученных кристаллах

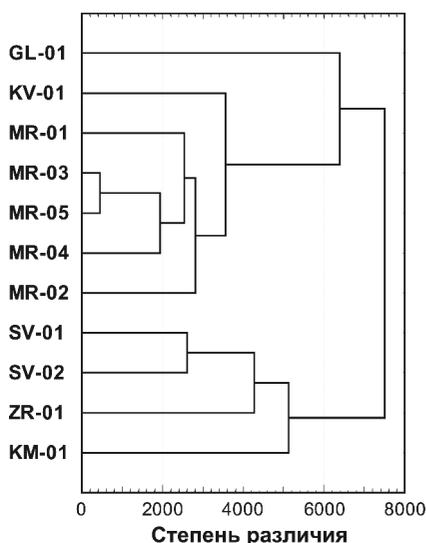


Рис. 5. Дендрограмма корреляционных связей между образцами берилла из Уральской изумрудной полосы по содержанию примесей

берилла. На диаграмме отчетливо выделяется группа образцов из Мариинского месторождения (группа I), состав которых коррелирует между собой в достаточно высокой степени. В меньшей степени похож на них берилл из Квартального месторождения. Можно отметить группу связанных между собой образцов берилла (группа II) разных генераций из Сретенского (Свердловского) месторождения, Заречного и Каменского проявлений. Однако корреляция между составом берилла из этих трех объектов существенно слабее, чем между образцами из Мариинского и Квартального месторождений. Берилл из Глинского проявления значительно отличается от всех вышеописанных, основное различие заключается в резкой обогащенности минерала Cs ($n \cdot 1000$ г/т) и обедненности Na ($n \cdot 100$ г/т) и Mg ($n \cdot 10$ г/т), в то время как берилл остальных объектов содержит $n \cdot 100$ г/т Cs и до нескольких процентов Mg и Na (табл. 2).

На рис. 6 представлены соотношения между содержанием Li, Cs, Na, Mg и Fe в проанализированных образцах берилла. Берилл Мариинского месторождения характеризуется практически постоянным отношением Na/Li при широко варьирующем отношении Li/Cs, а остальным свойственны близкие отношения Li/Cs при варьирующих Na/Li. Установлено, что соотношение щелочных металлов в берилле отражает геохимические и генетические характеристики растворов, с которыми связано бериллообразование [Neiva, Neiva, 2005]. В ходе эволюции флюида происходит увеличение Cs/Na и уменьшение Na/Li и Li/Cs в бериллах из гранитных пегматитов [Uher et al., 2010]. Отношение Mg/Fe характеризует состав пород, с которыми взаимодействовал минералообразующий флюид, а соотношение щелочных металлов — химический состав этого флюида. Таким образом, в образовании берилла из месторождений УИП могли принимать участие в различной степени эволюционировавшие флюиды.

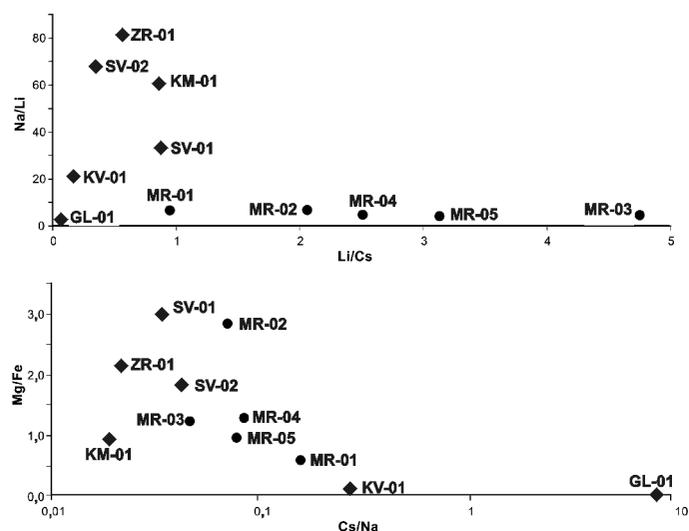


Рис. 6. Соотношение содержания примесей в изученных образцах берилла

На примере Сретенского месторождения видно, что флюиды, ответственные за формирование кварц-плагиоклазовых жил (образец SV-02), были обеднены Li и обогащены Na по сравнению с флюидами, с которыми связано образование слюдитовых жил (SV-01). Для образцов из Мариинского месторождения на рис. 6 хорошо видно, что во флюидах, участвовавших в формировании поздних по отношению к слюдитам кварц-плагиоклазовых жил (точки MR-01, MR-02), растет содержание Cs. Отношение Mg/Fe во всех образцах берилла из кварцевых жил низкое, в то время как берилл из слюдитов и связанных с ними плагиоклазовых жил характеризуется повышенным Mg/Fe-отношением. Берилл из проявлений Глинское и Квартальное образовался из наиболее эволюционировавшего флюида.

Дополнительную информацию для идентификации берилла из различных проявлений дают ИК-спектры колебания молекул воды в структурных каналах. Для сравнения характеристик спектров в этой области взято отношение интенсивности линий с максимумами 3698 и 3596 cm^{-1} , которое отражает соотношение количества молекул воды I и II типов. Это соотношение условно можно обозначить как отношение интенсивностей линий воды (ОИЛВ).

На рис. 7 показана диаграмма ОИЛВ для кристаллов берилла из месторождений УИП. У разных

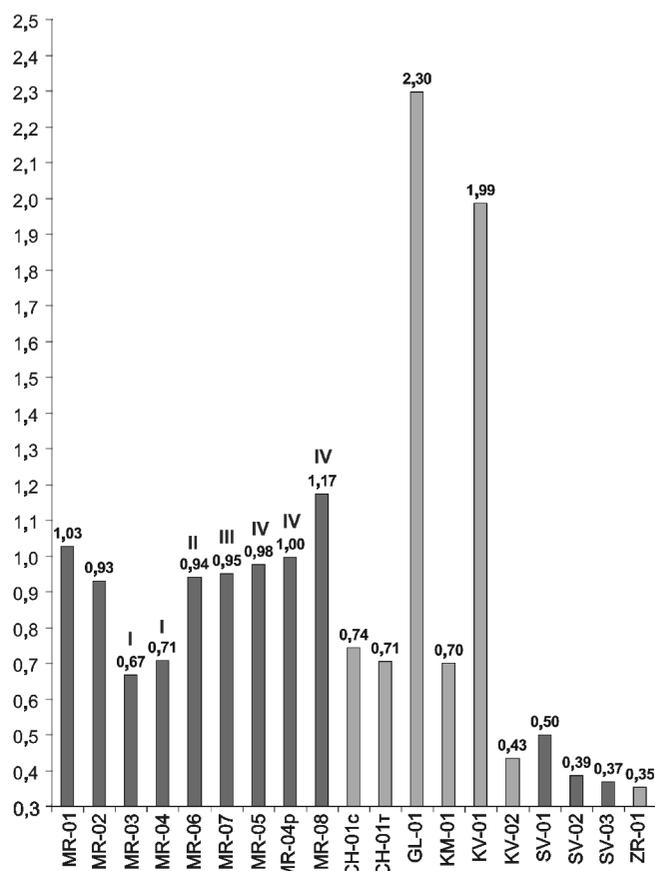


Рис. 7. Отношение интенсивности линии H₂O I типа в ИК-спектрах к интенсивности линии H₂O II типа в ИК-спектрах изученных бериллов. Римские цифры над величиной отношения — генерации берилла

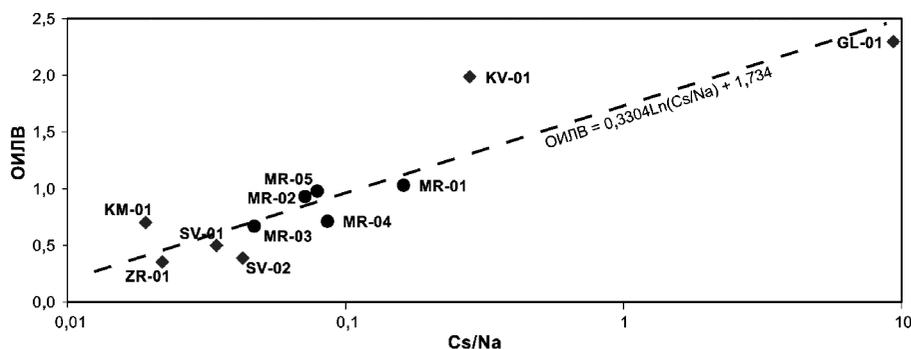


Рис. 8. Соотношение параметра ОИЛВ (отношение интенсивности линии воды I типа к интенсивности линии воды II типа) и отношения Cs/Na

генераций берилла из Мариинского и Сретенского месторождений изменение ОИЛВ от ранней к более поздним генерациям указывает на то, что в ходе эволюции растворов, участвовавших в формировании кристаллов, изменялся режим поступления щелочей. Это подтверждается диаграммами соотношения содержания Li, Na и Cs в этих кристаллах берилла.

Четко видно увеличение ОИЛВ от ранней к поздним генерациям берилла из Мариинского месторождения. Для самой ранней оно составляет 0,67, в то время как для наиболее поздней — 1,17. Зеленым бериллам соответствуют значения 0,93–0,94. В промежуток 0,67–1,17 также попадает ОИЛВ бериллов Черемшанского и Каменского месторождений — 0,71–0,74 и 0,70 соответственно. Квартальное месторождение по ОИЛВ резко отличается от предыдущих: 1,99 у берилла из кварцевой жилы и 0,42 у берилла из слюдитовых ксенолитов. В Свердловском месторождении ОИЛВ бериллов также отличается в разных породах: 0,50 в слюдите и 0,37–0,39 в плагиоклазовой жиле.

Все описанные выше месторождения связаны с Адуйским гранитным массивом. Что касается проявлений зеленого берилла на других участках, то проанализированы бериллы из Глинского (Мурзинский массив) и Заречного (Каменский массив) проявлений. У берилла из Глинского проявления ОИЛВ высокое

месторождения.

Как показано в работе [Aurischio et al., 1994] и на рис. 8, отношение интенсивности линий двух типов коррелирует с содержанием Na и отношением Cs/Na, которые характеризуют состав среды минералообразования.

Заключение. Таким образом, описанное отношение интенсивностей линий воды в ИК-спектрах непосредственно связано с условиями формирования месторождений и может служить типоморфным признаком бериллов, по которому можно в дальнейшем определять его генерации в пределах отдельно взятого месторождения на основе данных ИК-спектроскопии. Более того, можно с некоторой погрешностью определять величину отношения Cs/Na (формула на рис. 8). Это может существенно упростить идентификацию берилла, не прибегая к анализу химического состава.

Авторы выражают благодарность старшим научным сотрудникам кафедры минералогии геологического факультета МГУ им. Ломоносова М.Ф. Вигасиной за помощь в интерпретации результатов ИК-спектроскопических исследований, Л.В. Мельчковой за проведение термогравиметрических анализов и И.А. Брызгалову за микронзондовый анализ. Также авторы признательны руководителю лаборатории ГЕОХИ РАН Ю.А. Костицыну за ценные замечания в ходе ЛА–ИСП–МС измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Куприянова И.И. О генезисе Малышевского бериллий-изумрудного месторождения (Средний Урал, Россия) // Геология рудных месторождений. 2002. № 4. С. 314–330.

Куприянова И.И., Соколов С.В. Об условиях образования флогопит-берилловой минерализации // Там же. 1984. № 6. С. 32–44.

Машковцев Р.И., Стоянов Е.С., Томас В.Г. Состояние молекул и ионов в структурных каналах синтетического берилла с примесью аммония // Журн. структурной химии. 2004. Т. 45, № 1. С. 59–66.

Aines R.D., Rossman G.R. The high temperature behavior of water and carbon dioxide in cordierite and beryl // Amer. Miner. 1984. Vol. 69. P. 319–327.

Aurischio C., Grubessi O., Zecchini P. Infrared spectroscopy and crystal chemistry of the beryl group // Canad. Miner. 1994. Vol. 32. P. 55–68.

Giuliani G., France-Lanord C., Coget P. et al. Oxygen isotope systematics of emerald: relevance for its origin and geological significance // Mineral. Deposita. 1998. Vol. 33. P. 513–519.

Groat L.A., Giuliani G., Marshall D.D., Turner D. Emerald deposits and occurrences: A review // Ore Geology Rev. 2008. Vol. 34. P. 87–112.

Le T.T.H. Microscopic, chemical and spectroscopic investigations on emeralds of various origins. Dissertation. Johannes Gutenberg-Universität Mainz, 2008. 112 p.

McManus C.E., De Lucia F., Harmon R. et al. Trace element concentrations of pegmatite gems: tracers of petrogenesis and terrorist funding // Geol. Soc. of Amer., Abstr. with Programs. 2004. Vol. 36, N 5. P. 226.

Neiva A.M.R., Neiva J.M.C. Beryl from the granitic pegmatite at Namivo, Alto Ligonha, Mozambique // N. Jb. Miner. Abh. 2005. Bd 181/2. S. 173–182.

Uher P., Chudík P., Bačík P. et al. Beryl composition and evolution trends: an example from granitic pegmatites of the beryl-columbite subtype, Western Carpathians, Slovakia // *J. Geosci.* 2010. Vol. 55. P. 69–80.

Van Achterbergh E., Ryan C.G., Jackson S.E., Griffin W.L. Data reduction software for LA-ICP-MS: appendix // *Laser ablation-ICP-mass spectrometry in the earth sciences: Prin-*

ciples and applications // Mineralog. Assoc. Canada (MAC) Short Course Ser. Ottawa, Ontario, Canada. 2001. Vol. 29. P. 239–243.

Wood D.L., Nassau K. The characterization of beryl and emerald by visible and infrared absorption spectroscopy // *Amer. Miner.* 1968. Vol. 53. P. 777–800.

Поступила в редакцию
21.06.2010