

М.Л. ГАФТ, Б.С. ГОРОБЕЦ, С.В. МАЛИНКО

О ВОЗМОЖНОСТЯХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ДЛЯ ЭКСПРЕССНОГО ВЫЯВЛЕНИЯ И ДИАГНОСТИКИ МИНЕРАЛОВ БОРА В ГОРНЫХ ПОРОДАХ

Как известно, многие минералы бора, в том числе промышленные, весьма трудно диагностируются в горных породах как макроскопически, так и под микроскопом ввиду сходства с породообразующими минералами, а также между собой.

Проведенное исследование позволило обнаружить люминесценцию и объяснить ее природу в 41 минерале бора [1–3]. Изучение типичности этого свойства в различных образцах каждого минерала дало возможность выделить наиболее характерные цвета и спектры люминесценции в качестве новых диагностических признаков минералов бора (см. таблицу).

На рис. 1–4 приведены эталонные спектры фотолюминесценции (ФЛ) и рентгенолюминесценции (РЛ) при комнатной температуре (300 К) и температуре кипения азота (77 К) минералов бора, а также основных сопутствующих им породообразующих минералов, обладающих способностью люминесцировать. Люминесцентно-спектральные свойства даны последовательно. Сначала перечислены те из них, которые характеризуют минеральный вид уже при визуальном наблюдении — от наиболее типичного цвета для данного вида к менее типичным цветам свечения. Далее в качестве диагностической характеристики приведены типичные спектры люминесценции минералов, определяемые с помощью монохроматоров.

1. *Данбурит*: а) РЛ синяя, резко усиливающаяся при 77 К, обусловлена собственными центрами рекомбинации и излучения, в состав которых входят катионные вакансии, захватывающие дырки, и кислородные атомы лигандов, образующие широко распространенные дырочные центры, обозначаемые O^- [4]. Этот цвет РЛ наблюдается во всех образцах данбурита;

б) ФЛ зеленая, наблюдающаяся только при 77 К, вызвана изоморфной примесью Yb^{2+} , характерна лишь для образцов из месторождений Дальнегорское, Ак-Архар (промышленные [5]);

в) ФЛ голубая при 300 К, вызвана изоморфной примесью Eu^{2+} , характерна только для образцов из месторождений Учкошкон, Титовское (непромышленные [5]);

г) набор полос примесного происхождения в спектре РЛ при 300 К практически одинаков во всех исследованных образцах данбурита (рис. 1, кривая 1). Несколько изменяется только их относительная интенсивность в зависимости от различной концентрации примесных центров: Pb^{2+} , Ce^{3+} , Sm^{3+} , Gd^{3+} .

Анализ цвета и спектров свечения сопутствующих данбуриту породообразующих минералов (кварц, кальцит, доломит, флюорит) на всех изученных месторождениях и рудопроявлениях показал, что ни один из них не обладает подобным комплексом люминесцентных свойств (см. таблицу). Таким образом, РЛ данбурита является его постоянным свойством и служит надежным диагностическим признаком. В ряде случаев обнаружение и диагностика данбурита упрощается визуальным наблюдением ФЛ, последнее свойство может, однако, иногда отсутствовать. Ошибки при диагностике данбурита по указанным люминесцентным свойствам практически исключены.

2. *Датолит*: а) РЛ желтая при 300 К, обусловлена примесным Mn^{2+} , характерна для образцов из месторождений Ак-Архар, Дальнегорское, Саяк-IV и Змейка;

б) ФЛ голубая при 77 К обусловлена примесным Eu^{2+} , характерна для образцов из месторождений Ак-Архар, Дальнегорское;

в) ФЛ зеленая при 77 К, обусловлена примесью Yb^{2+} , обнаружена только в датолите из данбуритовой залежи на Дальнегорском месторождении (участок Левобережный) [5];

г) изредка встречаются образцы датолита с отсутствием перечисленных центров свечения. Они обладают очень слабой фиолетовой РЛ, обусловленной примесью Ce^{3+} . Диагностичные по λ_{max} полосы РЛ центра Ce^{3+} , а также Gtd^{3+} в УФ-области спек-

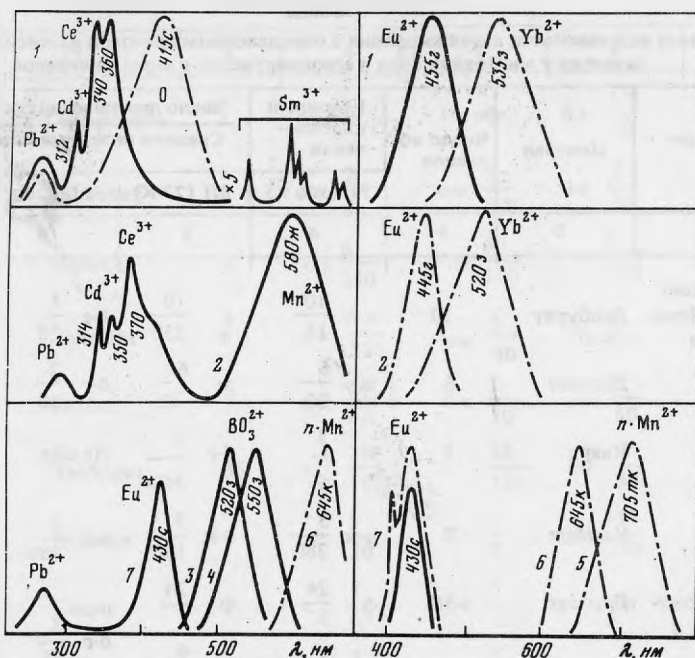


Рис. 1. Спектры рентгенолюминесценции (слева) и фотолуминесценции (справа) различных центров свечения в минералах бора

1 – данбурит, 2 – датолит, 3 – кальциборит, 4 – норденшельдин, 5 – джимбоит, 6 – севергинит, 7 – голвит; 300 К – сплошная линия, 77 К – штрих-пунктир

тра обнаружены у всех исследованных образцов, изменяется только их относительная интенсивность (рис. 1, кривая 2).

Ни один из сопутствующих датолиту люминесцирующих пороодообразующих минералов (кварц, кальцит, доломит, флюорит) не обнаружил подобного комплекса люминесцентных свойств (см. таблицу). Таким образом, образцы датолита, люминесцирующие в видимой области, надежно диагностируются визуально. В редких случаях отсутствия видимого свечения диагностическим признаком является спектр РЛ при 300 К в УФ-области. Отметим, что центры Ce^{3+} , Cd^{3+} в датолите и данбурите заметно различаются по спектральному положению полос (рис. 1, кривые 1 и 2).

3. *Кальциборит* всегда имеет при 300 К яркую зеленую РЛ с положением максимума при 520 нм (рис. 1, кривая 3); ФЛ отсутствует. РЛ вызвана рекомбинацией электронов на дырочных центрах, образованных, по-видимому, собственными треугольниками BO_3 , расположенными по соседству с катионными вакансиями (V_{Ca}). Ни один из сопутствующих кальцибориту минералов подобной люминесценцией не обладает (таблица).

4. *Норденшельдин* всегда имеет при 300 К яркую зеленую РЛ, отличающуюся от РЛ кальциборита смещением максимума полосы излучения до 550 нм (рис. 1, кривая 4). Свечение, скорее всего, вызвано собственными центрами, такими же, как в кальциборите. Сопутствующие минералы подобным свечением не обладают (таблица).

Зеленая РЛ является надежным, наиболее наглядным и доступным в аппаратурном отношении диагностическим признаком этих двух чрезвычайно трудно определяемых в рудах минералов.

5. *Джимбоит* имеет темно-красную низкотемпературную ФЛ в полосе с максимумом при 705 нм (рис. 1, кривая 5). Она вызвана собственными центрами Mn^{2+} и является стабильным диагностическим признаком этого редкого минерала, позволяющим проводить его надежное обнаружение и диагностику.

6. *Севергинит* имеет красную низкотемпературную ФЛ и РЛ в полосе с максимумом 650 нм (рис. 1, кривая 6). Как и у джимбоита, она обусловлена собственными центрами Mn^{2+} , но отличается смещением $\lambda_{\text{макс}}$. Люминесценция встречается во всех образцах севергинита, не содержащих примеси железа $> 1\%$. В отличие от севергинита его распространенный железосодержащий аналог – аксинит – не люминесцирует

Таблица
Частота встречаемости люминесценции с определенным цветом и интенсивностью
свечения у минералов бора и ассоциирующих с ними минералов

Месторождение	Минерал	Число образцов	Условный цвет свечения	Число люминесцирующих образцов			
				Средняя интенсивность свечения			
				РЛ (300 К)	РЛ (77 К)	ФЛ (300 К)	ФЛ (77 К)
1	2	3	4	5	6	7	
Дальнегорское: участок Лео- бережный	Данбурит	10	с $\frac{10}{15}$	с $\frac{10}{150}$	б-г $\frac{4}{30}$	з $\frac{8}{60}$	
	Датолит	6	ж $\frac{6}{80}$	ж $\frac{6}{20}$	б-г $\frac{2}{30}$	з $\frac{5}{45}$	
	Кварц	3	с $\frac{3}{6}$	б-г $\frac{3}{240}$	Не обн.	Не обн.	
	Кальцит	3	о-к $\frac{3}{280}$	о-к $\frac{3}{100}$	о-к $\frac{3}{280}$	о-к $\frac{3}{280}$	
участок Цент- ральный	Датолит	30	ф $\frac{24}{3}$ ж $\frac{6}{15}$	ф $\frac{24}{1}$ ж $\frac{6}{4}$	б-г $\frac{8}{25}$	г $\frac{26}{70}$	
	Флюорит	2	ф $\frac{2}{120}$	ф $\frac{2}{150}$	ф $\frac{2}{120}$	ф $\frac{2}{200}$	
	Кварц	4	с $\frac{4}{6}$	б-г $\frac{4}{240}$	Не обн.	Не обн.	
	Кальцит	5	о-к $\frac{5}{280}$	о-к $\frac{5}{100}$	о-к $\frac{5}{280}$	о-к $\frac{5}{280}$	
Гаурдак	Данбурит	3	с $\frac{3}{15}$	с $\frac{3}{150}$	Не обн.	Не обн.	
Титовское	Данбурит	1	с $\frac{1}{15}$	с $\frac{1}{150}$	г $\frac{1}{45}$	г $\frac{1}{45}$	
	Харкерит	1	о-к $\frac{1}{8}$	о-к $\frac{1}{2}$	Не обн.	Не обн.	
	Ольшанскит	2	Не обн.	Не обн.	$\frac{2}{40}$	$\frac{2}{70}$	
	Кальцит	3	о-к $\frac{3}{180}$	о-к $\frac{3}{70}$	о-к $\frac{3}{180}$	д-к $\frac{3}{180}$	
	Доломит	3	о-к $\frac{3}{150}$	о-к $\frac{3}{60}$	Не обн.	Не обн.	
	Кварц	4	с $\frac{4}{6}$	б-г $\frac{4}{250}$	"	"	
Солонго	Мп-курчато- вит	4	т-к $\frac{2}{120}$	т-к $\frac{4}{80}$	т-к $\frac{2}{120}$	т-к $\frac{4}{80}$	
	Боркарит	3	ж-о $\frac{3}{75}$	ж-о $\frac{3}{30}$	Не обн.	Не обн.	
	Солонгоит	1	о-к $\frac{1}{30}$	о-к $\frac{1}{10}$	"	"	
	Пентагидро- борит	4	т-к $\frac{4}{130}$	т-к $\frac{4}{30}$	Не обн.	Не обн.	

Таблица (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7
	Гексагидроборит	1	Не обн.	Не обн.	б-г $\frac{1}{30}$	б-г $\frac{1}{50}$
	Фроловит	2	о-к $\frac{2}{3}$	о-к $\frac{2}{0,5}$	б-г $\frac{2}{30}$	б-г $\frac{2}{50}$
	Кальцит	6	о-к $\frac{6}{250}$	о-к $\frac{6}{100}$	о-к $\frac{6}{250}$	о-к $\frac{6}{250}$
	Доломит	6	о-к $\frac{6}{220}$	о-к $\frac{6}{90}$	Не обн.	Не обн.
	Свабит	5	о-к $\frac{5}{60}$	о-к $\frac{5}{20}$	о-к $\frac{5}{60}$	о-к $\frac{5}{60}$
Ак-Архар	Данбурит	35	с $\frac{35}{15}$	с $\frac{35}{150}$	б-г $\frac{6}{30}$	з $\frac{28}{25}$
	Датолит	6	ж $\frac{6}{30}$	ж $\frac{6}{8}$	б-г $\frac{3}{30}$	г $\frac{5}{30}$
	Кварц	7	с $\frac{7}{6}$	б-г $\frac{7}{250}$	Не обн.	Не обн.
	Кальцит	5	о-к $\frac{5}{250}$	о-к $\frac{5}{80}$	о-к $\frac{5}{250}$	о-к $\frac{5}{250}$
	Доломит	4	о-к $\frac{5}{250}$	о-к $\frac{5}{70}$	Не обн.	Не обн.
Учкошкон	Данбурит	6	с $\frac{6}{15}$	с $\frac{6}{150}$	г $\frac{6}{20}$	г $\frac{6}{20}$
	Норденшельдин	3	з $\frac{3}{130}$	з $\frac{6}{60}$	б-г $\frac{3}{10}$	б-г $\frac{3}{20}$
	Кварц	5	с $\frac{5}{6}$	б-г $\frac{5}{240}$	Не обн.	Не обн.
	Кальцит	6	о-к $\frac{6}{280}$	о-к $\frac{6}{120}$	о-к $\frac{6}{280}$	о-к $\frac{6}{280}$
	Доломит	4	о-к $\frac{4}{220}$	о-к $\frac{4}{90}$	Не обн.	Не обн.
	Флюорит	1	ф $\frac{1}{100}$	ф $\frac{1}{50}$	”	ж $\frac{1}{150}$
Саяк-IV	Данбурит	16	с $\frac{16}{15}$	с $\frac{16}{150}$	Не обн.	Не обн.
	Датолит	2	ж $\frac{2}{20}$	ж $\frac{2}{8}$	”	”
	Кварц	10	с $\frac{10}{6}$	б-г $\frac{10}{200}$	”	”
	Кальциборит	5	з $\frac{5}{170}$	з $\frac{5}{60}$	Не обн.	Не обн.
	Кальцит	10	о-к $\frac{10}{300}$	о-к $\frac{10}{100}$	ф $\frac{10}{100}$	ф $\frac{10}{100}$
	Манган-кальцит	4	Не обн.	г-к $\frac{4}{120}$	Не обн.	Не обн.
	Доломит	7	о-к $\frac{7}{250}$	о-к $\frac{7}{250}$	”	”

Таблица (окончание)

1	2	3	4	5	6	7
Рудопроявления Югославии, Канады	Говлит	2	с $\frac{2}{20}$	с $\frac{2}{10}$	с $\frac{2}{20}$	с $\frac{2}{20}$
Япония	Джимбоит	1	Не обн.	Не обн.	Не обн.	т-к $\frac{1}{70}$
Новофрловское	Кальциборит	1	з $\frac{1}{170}$	з $\frac{1}{90}$	''	Не обн.
	Кальцит	2	о-к $\frac{2}{200}$	о-к $\frac{2}{100}$	о-к $\frac{2}{200}$	о-к $\frac{2}{200}$
	Доломит	2	о-к $\frac{2}{200}$	о-к $\frac{2}{100}$	Не обн.	Не обн.
	Свабит	2	о-к $\frac{2}{120}$	о-к $\frac{2}{70}$	о-к $\frac{2}{120}$	о-к $\frac{2}{120}$
Камыс	Свергинит	1	о-к $\frac{1}{50}$	к $\frac{1}{75}$	Не обн.	Не обн.
Индерское	Улексит	3	с $\frac{3}{0,5}$	Не обн.	''	б-г $\frac{1}{40}$
	Преображенский: измененный	2	с $\frac{2}{2}$	''	ж-з $\frac{2}{30}$	ж-з $\frac{2}{75}$
	неизмененный	1	с $\frac{1}{2}$	''	б-г $\frac{1}{80}$	б-г $\frac{1}{130}$
	Инбоит	2	Не обн.	''	г $\frac{2}{75}$	г $\frac{2}{170}$
	Сульфоборит	1	''	''	б-г $\frac{1}{20}$	б-г $\frac{1}{40}$
	Колеманит	2	''	''	б-г $\frac{2}{30}$	б-г $\frac{2}{80}$
	Пандермит	1	''	''	б-г $\frac{1}{10}$	б-г $\frac{1}{80}$
	Индерборит	1	''	''	б-г $\frac{1}{15}$	б-г $\frac{1}{30}$
	Пинноит	1	''	''	б-г $\frac{1}{5}$	б-г $\frac{1}{10}$
	Гидроборцит	4	''	''	б-г $\frac{4}{50}$	б-г $\frac{4}{60}$
	Индерит	2	''	''	б-г $\frac{2}{20}$	б-г $\frac{2}{40}$

Примечание. Для обозначения цвета люминесценции использованы общепринятые в оптике сокращения: ф — фиолетовый, с — синий, г — голубой, з — зеленый, ж — желтый, к — красный, б — белый, б-г — бело-голубой; ж-з — желто-зеленый; ж-о — желто-оранжевый; о-к — оранжево-красный; т-к — темно-красный. Над чертой указано число образцов минерала, обладающих данным цветом люминесценции; под чертой дано среднее арифметическое значение интенсивности люминесценции в максимуме соответствующей полосы всех изученных образцов данного минерала. Полужирным шрифтом отмечена фотолюминесценция сорбированных примесей в тех минералах, в которых она характеризуется послесвечением, хорошо наблюдаемым визуально.

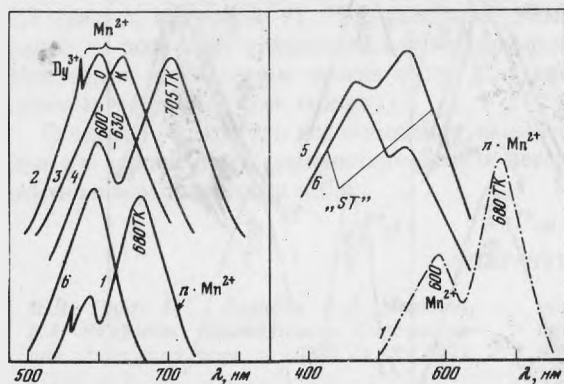


Рис. 2. Спектры рентгенолюминесценции (слева) и фотолюминесценции (справа) минералов бора из месторождения Солонго

1 – Мп-курчатовит, 2 – боркарит, 3 – солонгоит, 4 – пентагидроборит, 5 – гексагидроборит, 6 – фроловит; 300 К – сплошная линия, 77 К – штрих-пунктир

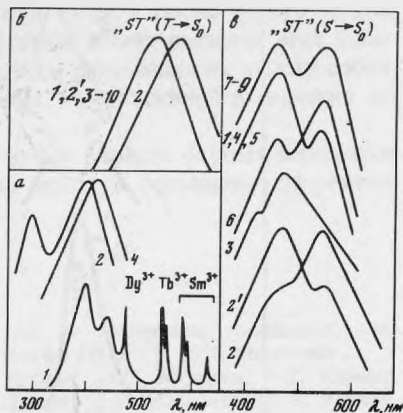


Рис. 3. Спектры рентгенолюминесценции (а) и фотолюминесценции (б – фосфоресценция, в – флуоресценция) при 300 К минералов бора месторождения Индерское

1 – улексит; 2 – преобразенсит измененный и 2' – неизменный; 3 – иньоит; 4 – колеманит; 5 – пинноит; 6 – сульфоборит; 7 – пандермит; 8 – индерборит; 9 – гидроборацит

вследствие тушения люминесценции железом. По этому свойству аксинит легко отличается от люминесцирующих данбурита и дадолита, часто встречающихся с ним в ассоциации.

7. *Говлит* обнаруживает голубую ФЛ и РЛ, которые обусловлены примесным Eu^{2+} . Признаком, позволяющим проводить люминесцентно-спектральную диагностику этого относительно редкого минерала, является узкая бесфонная линия в спектре ФЛ при 77 К (рис. 1, кривая 7). Такая же особенность в люминесценции Eu^{2+} известна еще у флюорита, однако от последнего говлит легко отличается по внешнему виду благодаря своей бесцветности, непрозрачности, выделению в виде мелоподобных бесструктурных масс, что не свойственно флюориту.

Указанные семь минералов оказалось возможным находить и уверенно определять с помощью перечисленных люминесцентных свойств во всех изученных нами месторождениях, что свидетельствует о достаточно общем характере этих свойств и возможности их повсеместного использования.

Многим другим минералам бора характерная "диагностическая" люминесценция присуща лишь на отдельных месторождениях. В этих минералах свечение обусловлено примесными центрами, обычно изоморфными ионами Mn^{2+} , и сорбированными органическими или водными комплексами, содержания которых в минералах непостоянны и потому люминесценция их сильно варьирует по интенсивности, вплоть до ее исчезновения. Ниже приводятся данные, показывающие возможность успешной люминесцентной диагностики многочисленных минералов двух изученных месторождений – Солонго и Индерское.

Минералы месторождения Солонго. 1. *Мп-курчатовит* диагностируется по темно-красной ФЛ с максимумом при 680 нм, появляющейся при 77 К, обусловленной видообразующим Mn^{2+} . Отдельные образцы с пониженным содержанием Мп обнаруживают темно-красную люминесценцию (ФЛ и РЛ), не потушенную при 300 К. В этом случае курчатовит труднее отличить от кальцита и некоторых борных минералов визуально, однако его можно уверенно различать по наличию полосы с $\lambda_{\text{макс}} = 680$ нм (рис. 2, кривая 1), тогда как у кальцита цвет свечения оранжево-красный и $\lambda_{\text{макс}} = 630$ нм.

2. *Боркарит* диагностируется по оранжево-желтой РЛ с $\lambda_{\text{макс}} = 600$ нм (рис. 2, кривая 2). Наиболее просто отличается от кальцита и свабита по отсутствию ФЛ. От доломита, также не имеющего ФЛ, боркарит визуально отличается с трудом (по оттенку РЛ), однако хорошо диагностируется по различному положению $\lambda_{\text{макс}}$ в спектре РЛ (у доломита 630 нм).

3. *Солонгоит* диагностируется по оранжево-красной РЛ с $\lambda_{\text{макс}} = 630$ нм при от-

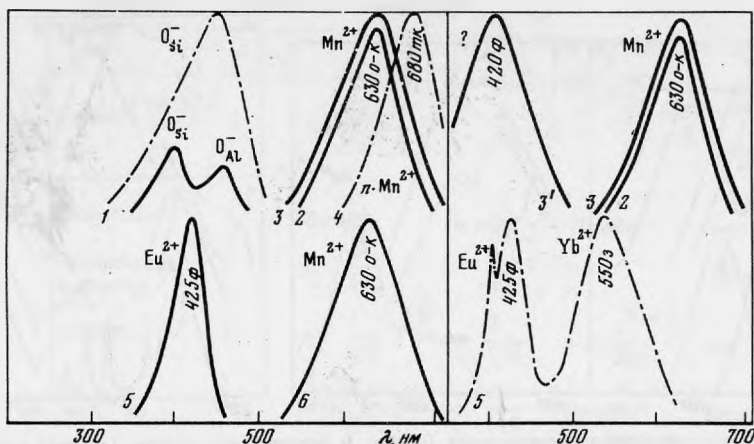


Рис. 4. Спектры рентгенолюминесценции (слева) и фотолуминесценции (справа) порообразующих минералов, сопутствующих минералам бора

1 – кварц; 2 – свабит; 3, 3' – кальцит; 4 – манганкальцит; 5 – флюорит; 6 – доломит

сутствии ФЛ, что отличает его от всех остальных борных минералов этого месторождения (рис. 2, кривая 3). От кальцита и свабита отличается отсутствием ФЛ. Ошибка возможна при разделении солонгоита и доломита, однако последний обычно характеризуется заметно большей интенсивностью свечения (см. таблицу).

4. *Пентагидроборит* диагностируется по темно-красной РЛ при 300 К, обусловленной центрами неизвестного происхождения с полосой при 710 нм (рис. 2, кривая 4).

5. *Гексагидроборит* обнаруживается и диагностируется на фоне нелюминесцирующего при фотовозбуждении пентагидроборита по бело-голубой ФЛ при 300 К (рис. 2, кривая 5). При 77 К свечение усиливается, к тому же начинает проявляться зеленое послесвечение, обусловленное сорбированными комплексами.

6. *Фроловит* диагностируется по бело-голубой ФЛ при слабой оранжево-красной РЛ при 300 К (рис. 2, кривая 6). Последнее отличает фроловит от гексагидроборита, не имеющего РЛ.

Показанная возможность использования люминесценции для выявления и диагностики солонгоита, фроловита, пентагидроборита и гексагидроборита важна ввиду внешнего сходства выделения этих минералов.

Минералы месторождения Индерское. Особенностью всех люминесцирующих минералов этого месторождения является обусловленность свечения сорбированными органическими и водосодержащими комплексами, вхождение которых особенно благоприятно в экзогенных условиях минералообразования.

1. *Улексит* визуально выделяется по синей РЛ и бело-голубой ФЛ при 300 К. Это единственный минерал на данном месторождении, в спектре РЛ которого обнаружены узкие линии центров TR^{3+} (Sm, Tb, Dy) (рис. 3, кривая 1). Поэтому однозначное определение улексита должно быть подтверждено наличием этих линий в его спектре РЛ.

2. *Преображенскит* характеризуется при 300 К синей РЛ и желто-зеленой ФЛ (рис. 3, кривая 2), при 77 К интенсивность ФЛ возрастает и проявляется яркое желто-зеленое послесвечение. Такую ФЛ имеет внешняя поверхность образцов, измененная взаимодействием с окружающей средой. Внутренняя неизменная поверхность характеризуется яркой бело-голубой ФЛ с зеленовато-голубым послесвечением. По люминесцентным свойствам преображенскит хорошо отличается визуально от всех минералов месторождения.

3. *Иньбит* диагностируется по яркой чисто-голубой ФЛ при 300 К. При 77 К ФЛ еще более усиливается и появляется голубовато-зеленая фосфоресценция (рис. 3, кривая 3). Такого цвета ФЛ не имеет ни один минерал на месторождении.

4. *Сульфоборит*, *колеманит*, *пандермит*, *индерборит*, *гидроборацит*, *пинноит*, *индерит* отличаются от остальных минералов по голубовато-белой ФЛ при 300 К с

зеленой фосфоресценцией, резко усиливающейся при 77 К, а также по отсутствию РЛ (рис. 3, кривые 4–9). Невыраженный спектральный состав свечения этих минералов не позволяет использовать ФЛ для достоверного разделения их между собой. Некоторую информацию иногда могут дать различия в интенсивности свечения отдельных минералов (см. таблицу).

Следует ожидать, что использование люминесцентных свойств борных минералов при их выявлении и диагностике внесет весомый вклад в повышение эффективности минералогических работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *М.Л. Гафт, Б.С. Горобец, С.В. Малинко, Р.А. Некрасова.* Исследование флуоресценции минералов бора. — ДАН СССР, 1977, т. 236, № 2.
2. *М.Л. Гафт, Б.С. Горобец, С.В. Малинко.* Центры люминесценции в минералах бора: (Крат. сводка). — В кн.: Закономерности распределения примесных центров в ионных кристаллах. М.: Ротапринт, ОЭП ВИС, 1977, вып. 5.
3. *М.Л. Гафт, Б.С. Горобец, С.В. Малинко.* Люминесцентная спектроскопия минералов бора. — В кн.: Использование результатов исследования люминесценции минералов в геологии. — Материалы совещания. Галлин: Изд-во АН ЭССР, 1978. Ротапринт.
4. *Ч.Б. Луцик, И.Л. Куусман, Т.Н. Кярнер, Н.Е. Луцик, А.Ф. Малышева, Н.В. Миленина, А.А. Ратас, Т.И. Савихина, Х.А. Соовик.* Электронные возбуждения и люминесценция окиси магния. — В кн.: Люминесценция и дефекты ионных кристаллов. — Тр. ИФ АН ЭССР. Тарту: Изд-во АН ЭССР, 1977, вып. 47. Ротапринт.
5. *М.Л. Гафт, Б.С. Горобец, С.В. Малинко.* Типохимический характер люминесценции редких земель в кальциевых боросиликатах. — ДАН АН СССР, 1979, т. 244, № 5.