

УДК 535.376

Статистический люминесцентный метод определения региона происхождения изумрудов

© 2019 г. **В. И. Соломонов***, ****, доктор физ.-мат. наук; А. В. Спирина***, канд. физ.-мат. наук; **М. П. Попов*****, канд. геол.-мин. наук; **М. А. Иванов******, канд. геол.-мин. наук; **А. И. Липчак***, канд. физ.-мат. наук

*Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург

**Уральский федеральный университет, Екатеринбург

***Уральский государственный горный университет, Екатеринбург

****Войсковая часть 68240, Москва

E-mail: plasma@iep.uran.ru, popovm1@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.04.2019

DOI:10.17586/1023-5086-2019-86-07-67-73

Методом импульсной катодолюминесценции исследовались большие выборки изумрудов из восьми мировых месторождений Бразилии, Китая, Замбии, России, Афганистана, Колумбии и Танзании с целью создания неразрушающего метода определения региона их происхождения. Показано, что средняя длина волны, дисперсия и обратная эффективная ширина полосы люминесценции в области 660–870 нм этих минералов подчиняются нормальному распределению с константами, характерными для каждого из регионов их происхождения. На основе этого предложен и апробирован статистический люминесцентный метод определения региона происхождения минералов. Показано, что этим методом однозначно определяется регион происхождения более 80% изумрудов.

Ключевые слова: изумруд, регион происхождения, импульсная катодолюминесценция, функция плотности распределения, доверительная вероятность.

Коды OCIS: 260.3800, 300.6280

Существуют два основных геолого-промышленных типа месторождений изумрудов. Первый тип получил название «колумбийский», так как большинство месторождений этого типа находится в Колумбии [1]. Похожие объекты выявлены также в Афганистане [2]. Эти месторождения обеспечивают до 80% объема мировой добычи изумруда. Второй тип месторождений называют «сланцевым». Одно из первых месторождений этого типа было открыто в 1831 г. на Среднем Урале, поэтому иногда месторождения этого типа называют «уральскими» [3].

Изумруды относятся к драгоценным камням, их стоимость зависит от цвета, чистоты, массы и региона происхождения. Одной из важнейших является проблема незаконного ввоза этих драгоценных камней в нашу страну. В связи с этим возникает необходимость в разработке оперативных методов установления подлинности региона их происхождения. Ввиду того, что каждое ме-

сторождение характеризуется индивидуальными геохимическими особенностями кристаллизации минералов, эти особенности должны проявляться как признаки их принадлежности к определенному месторождению. Ранее в работе [4] было показано, что эти признаки проявляются в отличиях структуры спектров люминесценции, причем при достаточно большой выборке минералов из разных месторождений их измеряемые спектрально-люминесцентные параметры должны подчиняться законам математической статистики.

Целью настоящей работы является исследование возможности применения методов статистики к параметрам импульсной катодолюминесценции (ИКЛ) изумрудов для определения регионов их происхождения.

Большинство образцов изумрудов с основных мировых месторождений были приобретены на российских минералогических выставках «Минерал-Шоу» (Екатеринбург) и «Гемма» (Москва). Часть

материала была приобретена на международных минералогических ярмарках в Мюнхене (Германия) и Туссоне (США), а также в интернет-магазине «Ярмарка-мастеров». Всего было исследовано 869 образцов из восьми мировых месторождений: Бразилия (Карнаиба) — 114, Бразилия (Капоерана) — 117, Китай (Дъякоу) — 103, Замбия (Кафубу) — 112, Россия (Мариинское) — 113, Афганистан — 108, Колумбия — 102 и Танзания — 100 образцов. Практически все образцы имели зональную окраску. Поэтому для проведения объективных люминесцентных исследований образцы распиливались на отдельные куски одинакового цвета, каждый из которых подвергался спектральным люминесцентным исследованиям.

Импульсная катодолюминесценция возбуждалась электронным пучком длительностью 2 нс, плотностью тока 90 A/cm^2 при средней энергии электронов 150 кэВ. Образцы не подвергались специальной механической и химической обработке и облучались на воздухе при комнатной температуре. Спектры люминесценции каждого образца регистрировались многоканальным фотоприемником, совмещенным с дифракционным спектрографом, в спектральном диапазоне 550–870 нм с точностью $\pm 0,5$ нм. Экспозиция при измерении всех спектров составляла 40 мс.

Спектры ИКЛ изумрудов всех месторождений являются однотипными. В качестве иллюстрации на рис. 1 приведены спектры ИКЛ образцов из Мариинского месторождения России (рис. 1а) и месторождения Дъякоу Китая (рис. 1б). Примесный состав этих образцов представлен в табл. 1. Во всех спектрах доминирует широкая слабоструктурированная полоса красной люминесценции в диапазоне 650–870 нм с абсолютным максимумом в области 700–760 нм. Основной вклад в ее люми-

Таблица 1. Содержание примесей (масс ppm) в образцах изумрудов, спектры ИКЛ которых представлены на рис. 1

№ образца	На рис. 1а			На рис. 1б		
	Cr	Fe	V	Cr	Fe	V
1	0,2	5910	48,6	53,0	5730	180,3
2	36,0	5460	53,2	427,0	5600	315,8
3	1765,6	5900	61,1	694,3	6050	454,9
4	4172,1	6660	41,2	2258,8	6190	937,8

несценцию вносит широкая полоса иона железа Fe^{3+} с максимумом в области 730–750 нм [5, 6]. На ее коротковолновое крыло накладываются узкие дублетные R-линии на 679 и 682 нм ионов Cr^{3+} и N-линии пар $\text{Cr}^{3+}\text{-Cr}^{3+}$ в области 690–710 нм [5]. В некоторых образцах люминесценция иона V^{3+} наблюдается в виде слабой широкой полосы в области 600 нм [7, 8]. В то же время ионы V^{3+} способны безызлучательно передавать энергию возбуждения ионам Cr^{3+} и Fe^{3+} и оказывать влияние на контур красной полосы люминесценции. Этот эффект наиболее наглядно проявляется в китайских образцах, обогащенных ванадием (рис. 1б, крияя 4). Контуры красной полосы люминесценции отдельных областей зонально окрашенного образца различаются, что указывает на разное содержание примесных ионов в этих областях. Однако это различие, как правило, не столь существенно по сравнению с различием контуров красной полосы разных образцов.

Таким образом, контур красной полосы 650–870 нм ИКЛ изумрудов определяется содержанием ионов-люминогенов Fe^{3+} и Cr^{3+} , пар $\text{Cr}^{3+}\text{-Cr}^{3+}$, а также вероятностью передачи энергии возбуждения от примесных ионов ванадия ионам хрома

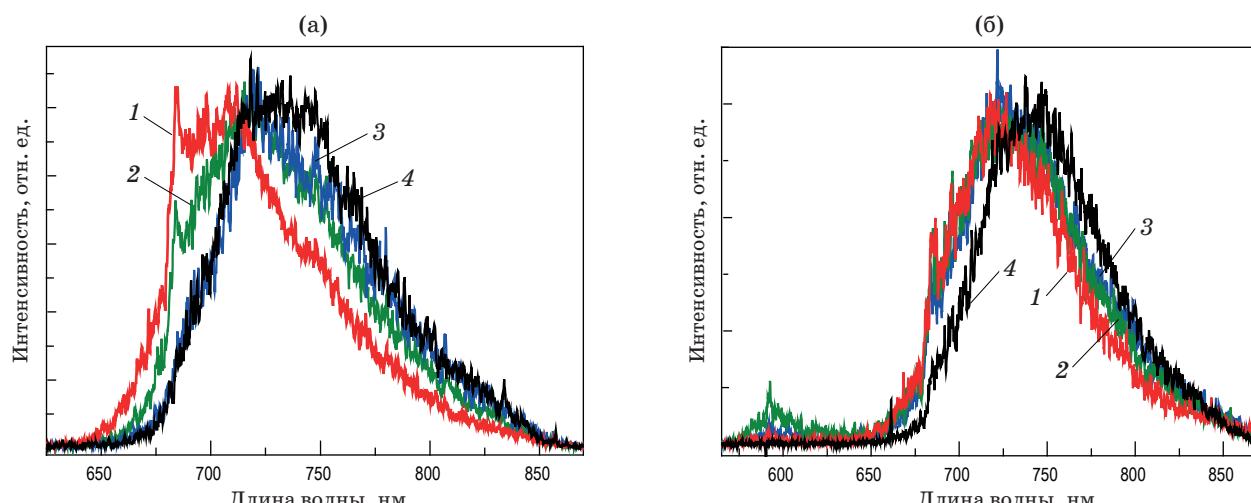


Рис. 1. Спектры ИКЛ образцов с близким содержанием железа из Мариинского месторождения России (а) и китайского месторождения Дъякоу (б). Их примесный состав представлен в табл. 1, нумерация образцов в таблице соответствует нумерации спектров на рисунках (1 — красный, 2 — зеленый, 3 — синий, 4 — черный).

и железа. Поэтому разное содержание примесей приводит к заметному изменению контура этой полосы (рис. 1). Формы контуров полос образцов разных месторождений различаются, но в них отсутствуют явные спектральные признаки принадлежности минерала тому или иному месторождению. Некоторое исключение представляют собой изумруды из Китая с высоким содержанием ванадия, в которых проявляется полоса люминесценции на 600 нм.

Удовлетворительным отличительным признаком месторождения минералов является интенсивность их люминесценции I . Ее значения для изумрудов разных месторождений соотносятся как

$$I_1 \geq I_2 \geq I_3 \geq I_4 \approx I_5 \approx I_6 \approx I_7, \quad (1)$$

где подстрочные индексы 1, 2, 3, 4, 5, 6, и 7 соответствуют месторождениям Колумбии, Бразилии, Афганистана, Китая, Мадагаскара, Замбии и России соответственно.

Наиболее высокая интенсивность люминесценции наблюдается в изумрудах Колумбии, а низкая — в изумрудах России из Уральской изумрудной полосы. Причем отношение интенсивностей люминесценции минералов этих двух месторождений достигает трех-четырех порядков. Однако для определения региона происхождения без нарушения целостности образца интенсивность ИКЛ можно использовать только как полукаличественный параметр. Это связано с тем, что измеряемая интенсивность зависит не только от месторождения минерала, но и от площади его излучающей поверхности, с которой регистрируется люминесценция. У природных минералов различных форм, размеров и поверхностной дефектности невозможно сделать одинаковую площадь излучающей поверхности без нарушения их целостности.

Хотя спектр ИКЛ изумрудов не содержит явных признаков региона их происхождения, тем не менее, контуры красной полосы ИКЛ изумрудов разных месторождений заметно различаются. По существу, контур этой полосы представляет собой статистическое распределение интенсивностей по длинам волн $I(\lambda)$ и характеризуется моментами распределения. В качестве таковых удобно использовать λ_0 — среднюю длину волны (медиану), σ — среднеквадратическую ширину полосы (дисперсию) и α — обратную эффективную ширину полосы, которые определяются как

$$\begin{aligned} \lambda_0 &= \int \lambda I(\lambda) d\lambda / \int I(\lambda) d\lambda, \\ \sigma^2 &= \int (\lambda - \lambda_0)^2 I(\lambda) d\lambda / \int I(\lambda) d\lambda, \\ \alpha &= I(\lambda_0) / \int I(\lambda) d\lambda. \end{aligned} \quad (2)$$

В этих формулах нижний и верхний пределы интегрирования соответствуют 660 и 870 нм соответственно.

Таким образом, каждый i -й изумруд можно характеризовать тройкой спектрально-люминесцентных параметров $[\lambda_{0i}, \sigma_i, \alpha_i]$ (2). Оказалось, что в таком представлении распределение изумрудов одного и того же месторождения в пространстве этих параметров образует некое облако. Его проекции на плоскости $\{\lambda_0, \sigma\}$ изумрудов России и Афганистана приведены на рис. 2. Из рисунка видно, что параметры (2) являются независимыми случайными величинами. В то же время это облако и его проекции не всегда являются центрально симметричными. В распределениях изумрудов большинства месторождений наблюдается линейный тренд (рис. 2а), а в распределениях месторож-

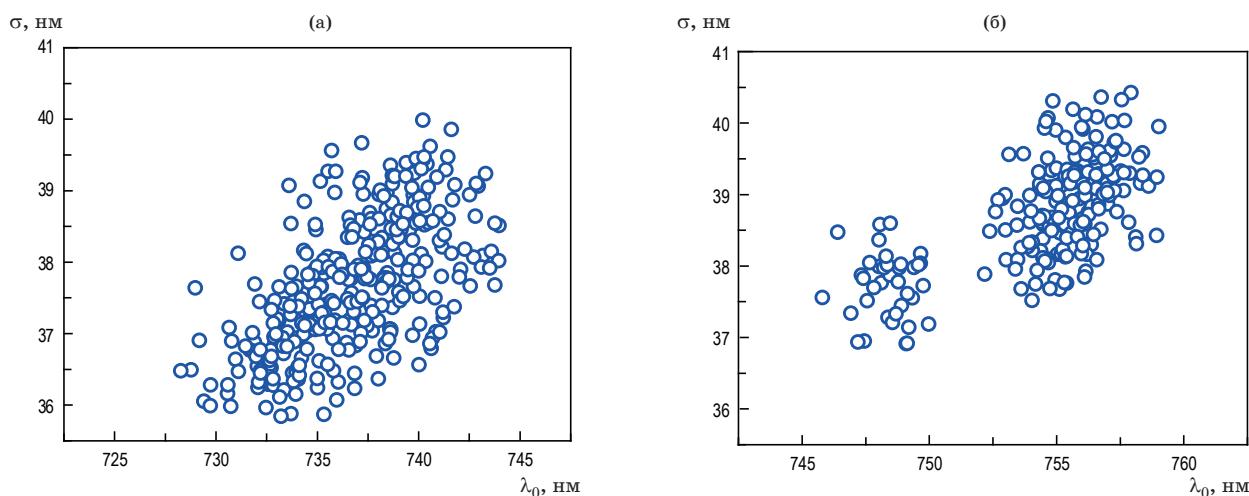


Рис. 2. Проекции на плоскости $\{\lambda_0, \sigma\}$ распределений изумрудов Уральской изумрудной полосы (Россия) (а) и Афганистана (б).

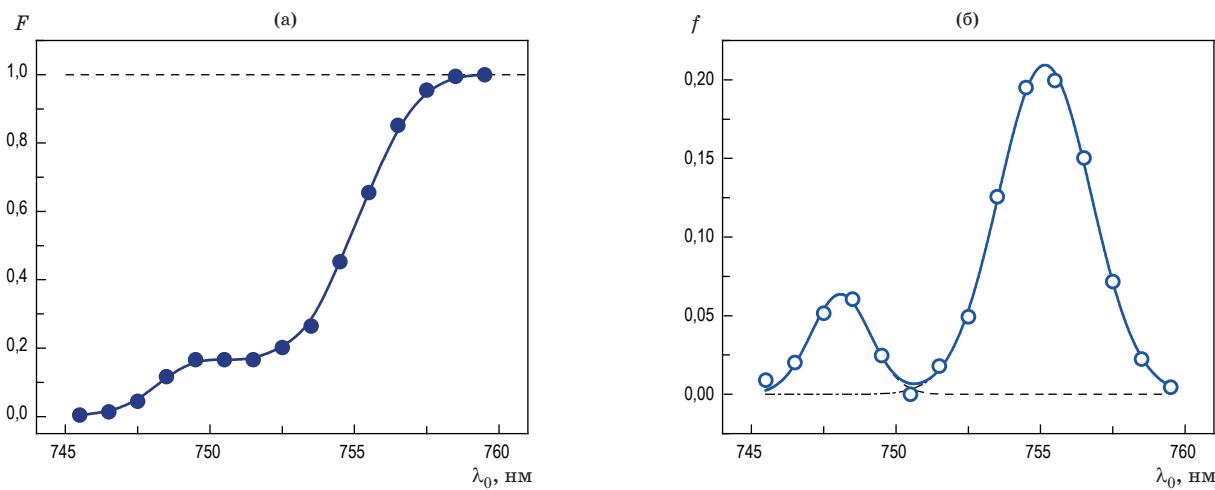


Рис. 3. Эмпирическая интегральная функция распределения изумрудов из Афганистана $F(\lambda_0)$ (а) и функция плотности распределения $f(\lambda_0)$ (б) как результат численного дифференцирования $F(\lambda_0)$ (символы) и аппроксимации суммой двух гауссоид (сплошная кривая), гауссоиды представлены штриховыми кривыми.

дений Афганистана, Китая и Танзании выделяются по две отдельных области с симметрией, близкой к центральной (рис. 2б).

Эмпирические интегральные функции выборки этих обоих типов распределений

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(t)dt \quad (3)$$

имеют локальный максимум или перегиб (рис. 3а). При этом $f(x)$ — функция плотности распределения изумрудов по параметру $x = \lambda_0$, σ и α , получаемая путем дифференцирования эмпирической функции $F(x)$, описывается суммой двух гауссоид с коэффициентами a и b с коэффициентом корреляции $R^2 \geq 0,99$

$$f_j(x_i) = \frac{a}{\sqrt{2\pi}\Delta x_{j1}} \exp\left(-\frac{(x_i - x_{j1})^2}{2(\Delta x_{j1})^2}\right) + \frac{b}{\sqrt{2\pi}\Delta x_{j2}} \exp\left(-\frac{(x_i - x_{j2})^2}{2(\Delta x_{j2})^2}\right). \quad (4)$$

Это указывает на то, что распределения изумрудов большинства месторождений в пространстве параметров (2) являются нормальными. В табл. 2 приведены константы x_i и Δx_i нормальных распределений спектрально-люминесцентных параметров x всех месторождений исследованных изумрудов. Из таблицы видно, что изумрудам каждого месторождения характерны двухмодальные распределения по одному или двум спектрально-люминесцентным параметрам, из которых каждая мода является нормальным распределением. Естественной причиной двухмодальности является

различие геохимических условий кристаллизации по глубине месторождения или на разных флангах. Константы распределений λ_{0j} и $\Delta\lambda_{0j}$, σ_j и $\Delta\sigma_j$, α_j и $\Delta\alpha_j$ являются статистическими спектрально-люминесцентными признаками j -го месторождения.

Поскольку параметры $x_i = \lambda_{0i}$, σ_i и α_i красной полосы ИКЛ i -го образца изумруда являются статистически независимыми случайными и одновременно измеряемыми величинами, то количественной мерой принадлежности этого камня j -му региону является доверительная вероятность

$$P_{ij} = p_j(\lambda_{0i}) p_j(\sigma_i) p_j(\alpha_i). \quad (5)$$

Она равна произведению парциальных вероятностей $p_j(x_i)$, отражающих соответствие параметра x_i i -го тестируемого образца распределению образцов по x в j -м месторождении. При нормальном распределении парциальные вероятности вычисляются как

$$p_j(x_i) = 1 - 2\Phi_0(y_i). \quad (6)$$

Здесь

$$y_i = \frac{x_i - x_j}{\Delta x_j},$$

$$\Phi_0(y_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{y_i} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt,$$

где — $\Phi_0(y_i)$ — интеграл Пуассона.

За нижний значимый предел парциальной вероятности (6) принимается ее значение при $y_i = 3$. Он равен $p_{\min} = 0,003$. Тогда нижний предел доверительной вероятности (5) составляет

Таблица 2. Константы распределений спектрально-люминесцентных параметров изумрудов по месторождениям

Месторождение	Параметры распределений		
	$\lambda_{0j}(\Delta\lambda_{0j})$, нм	$\sigma_j(\Delta\sigma_j)$, нм	$\alpha_j(\Delta\alpha_j) \times 10^2$, нм^{-1}
Афганистан	748,08 (2,04) 755,15 (3,20)	38,55 (1,70)	1,0051 (0,0331) 0,9177 (0,0897)
Бразилия (Карнаиба)	738,71 (2,06) 742,13 (2,88)	39,29 (1,95)	0,9029 (0,1229)
Бразилия (Капоерана)	742,45 (4,89)	39,38 (1,80)	0,9127 (0,0781)
Замбия (Кафубу)	739,75 (3,26) 743,38 (3,17)	38,24 (1,64)	0,9584 (0,0400) 0,8868 (0,0711)
Россия (Мариинское)	733,65 (2,57) 737,87 (3,38)	36,96 (1,32) 38,38 (1,33)	0,9413 (0,0811)
Китай (Дъякоу)	740,86 (3,53)	40,02 (2,00)	0,9331 (0,1132)
Колумбия	740,93 (3,85)	37,90 (1,50)	0,9067 (0,1091)
Танзания	752,93 (1,73) 755,44 (2,68)	39,88 (1,13)	0,9235 (0,0759) 0,8366 (0,1002)

Примечание. В скобках указаны дисперсии распределений Δx_j соответствующих параметров.

$(P_{ij})_{\min} = 3p_{\min} = 0,009 = 0,9\%$. При двухмодальном распределении в формулу (5) подставляется максимальное из вычисленных $p_j(x_i)$ по каждой моде значение (6).

Для иллюстрации метода в табл. 3 приведены значения доверительной вероятности P_{ij} соответствия китайских изумрудов как собственному (декларированному), так и другим регионам происхождения. В выборку включены отдельные зоны окраски каждого из минералов, обозначенных в первом столбце через подстрочную черту после номера образца. Жирным шрифтом выделены значения доверительных вероятностей принадлежности изумрудов декларированному месторождению.

Из табл. 3 видно, что доверительные вероятности принадлежности образцов декларированному региону почти во всех случаях отличаются от нуля. Однако для отдельных зон окраски ряда минералов доверительная вероятность соответствия истинному региону происхождения равна нулю. Такой результат следует считать случайным несответствием, связанным с индивидуальными геохимическими условиями кристаллизации данной зоны окраски минерала. В частности, в образцах из Китая (табл. 3) их доля составляет 13,7%. Это обстоятельство указывает на то, что в случае неоднородно окрашенных минералов необходимо регистрировать и обрабатывать спектры ИКЛ с каждой зоны окраски.

У небольшой группы изумрудов доверительная вероятность отличается от нуля не только для декларированного, но и для двух-трех других регионов происхождения. В табл. 4 приведены статистические данные в виде процентной доли изумрудов декларированного месторождения с отличными от нуля доверительными вероятностями

Таблица 3. Значения вероятностей в процентах, рассчитанные с использованием констант распределений спектрально-люминесцентных параметров месторождений (табл. 2), образцов изумрудов Дъякоу (Китай)

Образец	Дъякоу, Китай	Бразилия, Карнаиба	Бразилия, Капоерана	Замбия	Россия	Афганистан	Колумбия	Танзания
11_1	11	1	11	7	1	0	3	0
11_2	41	0	24	0	0	0	0	0
11_3	1	0	3	0	0	0	0	0
11_4	7	1	11	7	1	0	5	0
12_1	23	0	4	0	0	0	0	0
12_2	1	0	0	0	0	0	0	0
13_1	27	0	1	0	0	0	0	0
14_2	7	0	2	0	3	0	0	0
14_3	0	0	0	0	0	0	0	0
15_1	38	0	3	0	0	0	0	0
15_2	6	1	2	0	0	0	1	0
15_3	11	0	20	2	0	0	0	0
16_1	34	0	13	0	0	0	0	0
16_2	2	0	0	0	0	0	0	0
16_3	7	0	12	0	6	0	3	0
17_1	30	0	3	0	0	0	0	0
17_2	2	0	7	0	0	0	0	0
17_3	8	0	1	0	0	0	0	0
18_1	27	0	9	1	2	0	0	0
18_2	4	0	0	0	1	0	0	0
18_3	58	0	5	1	0	0	0	0
20_1	3	0	13	0	0	0	0	0
22_2	35	0	6	0	0	0	0	0
22_3	28	0	40	1	1	0	7	0
23_1	27	0	4	0	0	0	0	0
23_2	50	0	5	0	0	0	0	0

Продолжение табл. 3

Окончание табл. 3

	Образец	Дъяков, Китай	Бразилия, Карнаиба	Бразилия, Капоерана	Замбия	Россия	Афганистан	Колумбия	Танзания	Образец	Дъяков, Китай	Бразилия, Карнаиба	Бразилия, Капоерана	Замбия	Россия	Афганистан	Колумбия	Танзания
24_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	35_3	63	0	12	0	0	0	0	0
25_1	3	0	31	10	0	0	0	0	0	38_1	5	0	1	0	0	0	0	0
25_2	20	0	29	1	0	0	0	1	0	38_2	5	0	6	0	0	0	0	0
25_3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	38_3	0	0	0	0	0	0	0	0
26_1	49	0	34	0	0	0	0	0	0	41_1	12	0	0	0	0	0	0	0
26_2	14	0	26	1	0	0	0	0	0	41_2	12	0	5	0	0	0	0	0
26_3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	41_3	2	0	0	0	0	0	0	0
27_1	56	0	9	0	0	0	0	0	0	41_4	15	0	7	1	0	0	1	0
27_2	12	0	1	0	0	0	0	0	0	41_5	10	0	2	0	0	0	0	0
27_3	20	0	5	0	0	0	0	0	0	42_1	10	0	1	0	0	0	0	0
28_1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	42_2	47	0	6	0	0	0	0	0
28_2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	42_3	11	0	3	0	0	0	0	0
28_3	1	0	3	0	0	0	0	0	0	43_1	2	0	5	0	0	0	0	0
29_1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	43_2	1	2	1	0	0	0	1	0
29_2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	43_3	15	0	30	1	0	0	0	0
29_3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	44_1	0	0	0	0	0	0	0	0
30_1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	44_2	1	0	0	0	0	0	0	0
30_2	31	0	10	0	0	0	0	0	0	45_1	2	0	15	9	0	0	2	0
31_1	8	0	0	0	0	0	0	0	0	45_3	0	0	0	0	0	0	0	0
31_2	23	0	2	0	0	0	0	0	0	46_1	3	2	0	1	1	0	2	0
31_3	23	0	3	0	0	0	0	0	0	46_2	10	1	2	6	1	0	2	0
32_1	29	0	43	1	0	0	0	0	0	46_3	12	0	7	16	11	0	5	0
32_2	1	0	1	0	0	0	0	0	0	47_1	0	0	0	0	0	0	0	0
32_3	17	0	8	0	0	0	0	0	0	47_2	1	1	0	0	0	0	0	0
33_1	18	0	24	3	1	0	8	0	0	47_3	0	0	0	0	0	0	0	0
33_2	12	1	7	21	3	0	12	0	0	48_1	1	0	0	0	0	0	0	0
33_3	6	0	1	0	0	0	0	0	0	48_2	3	0	1	0	0	0	0	0
34_1	16	0	1	0	0	0	0	0	0	48_3	2	0	0	0	0	0	0	0
35_2	23	0	1	0	0	0	0	0	0	50_1	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица 4. Доля изумрудов в процентах с отличными от нуля доверительными вероятностями принадлежности разным месторождениям

Декларированное месторождение	Месторождения							
	Бразилия, Карнаиба	Бразилия, Капоерана	Китай	Россия	Афганистан	Колумбия	Танзания	Замбия
Бразилия, Карнаиба	86,7	58,6	32,4	13,6	0	6,8	0	9,6
Бразилия, Капоерана	45,3	83,1	22,8	5,5	0	14,0	0	10,7
Китай	36,3	20,3	86,3	2,7	0	1,6	0	4,9
Россия	19,5	14,2	12,0	83,1	0	19,9	0	17,2
Афганистан	0	0	0	0	77,0	0	14,9	0
Колумбия	39,9	31,1	20,2	7,8	0	88,6	0	39,9
Танзания	0	0	0	0	13,9	0	80,6	0
Замбия	46,3	36,9	16,4	18,7	0	40,7	0	90,2

Примечание. Диагональные значения в таблице соответствуют доле изумрудов, включая их отдельные зоны окраски, для которых доверительная вероятность принадлежности образца декларированному месторождению имеет не-нулевые значения.

принадлежности любому из месторождений. Видно, что доверительные вероятности 77–90% образцов отличны от нуля именно для декларированной страны месторождения изумрудов. То есть случайное несоответствие отдельных зон окраски минералов их истинному региону происхождения составляет 10–23%.

Отличные от нуля доверительные вероятности P_{ij} соответствия изумрудов не только декларированному, но и другим месторождениям обусловлены перекрытием крыльев функций распределений всех трех спектрально-люминесцентных параметров (табл. 2). Причем с математической точки зрения эти вероятности равноправны. Частично в перекрытие попадают спектрально-люминесцентные параметры отдельных зон окраски образца. Эти перекрытия носят «случайный» характер и могут быть исключены путем увеличения количества регистрируемых спектров ИКЛ с разных зон окраски минерала. При этом образец следует отнести к тому месторождению, у которого доверительные вероятности, вычисленные по параметрам хотя бы одного спектра, не равны нулю при нулевых значениях вероятности в других месторождениях. Экспериментальные исследования показали, чтобы исключить это «случайное» перекрытие достаточно зарегистрировать спектры ИКЛ трех зон образца.

Однако у части изумрудов перекрытие распределений носит стабильный характер. Причем самое большое перекрытие, когда доверительная

вероятность «чужого» месторождения больше или равна вероятности декларированного месторождения (выделены курсивом в табл. 3), наблюдается у пар месторождений: Бразилия (Капоерана) — Бразилия (Карнаиба), Колумбия — Бразилия (Капоерана), Колумбия — Замбия, Замбия — Бразилия (Капоерана), Бразилия (Капоерана) — Китай, Россия — Колумбия, Колумбия — Китай. Статистический люминесцентный метод выделяет два, иногда три, наиболее вероятных региона происхождения таких образцов. Причем, одним из двух месторождений с отличной от нуля доверительной вероятностью является, как правило, колумбийское или бразильское. Изумруды этих месторождений обладают наиболее интенсивной ИКЛ (1), что может быть использовано для однозначной идентификации региона происхождения.

По результатам обработки спектров ИКЛ предложен люминесцентный статистический метод определения региона происхождения изумрудов. Его апробация на образцах известных восьми регионов добычи показала работоспособность метода. Рассчитаны вероятности принадлежности изумрудов разным месторождениям, которые указывают, что 77–90% изумрудов однозначно соответствуют декларированным месторождениям. Высокая экспрессность метода позволяет использовать его для идентификации регионов происхождения изумрудов при больших потоках этих минералов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Banks D.A., Giuliani G., Yardley B.W.D., Cheillett A. Emerald mineralization in Colombia: Fluid chemistry and the role of brine mixing // Mineralium Deposita. 2000. V. 5. P. 699–713.
2. Bowersox G.W., Anwar J. The Gujar Killi emerald deposit, Northwest Frontier Province, Pakistan // Gems and Gemology. 1989. V. 25. P. 16–24.
3. Попов М.П. Геолого-минералогические особенности редкометальной минерализации в Восточном экзоконтакте Адуйского массива в пределах Уральской изумрудоносной полосы. Екатеринбург: изд. УГГУ, 2014. 136 с.
4. Соломонов В.И., Спирина А.В., Попов М.П., Кайгородова О.А. Люминесцентные признаки месторождений драгоценных бериллов // Оптический журнал. 2016. Т. 83. № 8. С. 58–62.
5. Таращан А.Н. Люминесценция минералов. Киев: Наукова думка, 1978. 296 с.
6. Платонов А.Н., Таран М.Н., Польшин Э.В., Минько О.Е. О природе окраски железосодержащих бериллов // Изв. АН СССР. Сер. Геологич. 1979. № 10. С. 54–68.
7. Платонов А.Н., Таращан А.Н. Оптическая спектроскопия ванадия в природных минералах. Спектры поглощения комплексов V^{4+} и V^{3+} // Конституция и свойства минералов. 1973. Вып. 7. С. 75–81.
8. Лопатин О.Н., Хайбуллин Р.И., Николаев А.Г. Имплантация ионов ванадия в кристаллическую структуру природного берилла // Изв. вузов. Геология и разведка. 2010. № 6. С. 12–16.