УДК 535.37, 549.02 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2022-3-21-27

Люминесцентные характеристики полевых шпатов

Владимир Иванович СОЛОМОНОВ[1,2*]
Альфия Виликовна СПИРИНА[1**]
Михаил Петрович ПОПОВ[3,4***]
Анна Сергеевна МАКАРОВА[1]

[1]Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия
[2]Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия
[3]Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия
[4]Институт геологии и геохимии им. акад. А. Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Цель работы – изучение спектров и кинетики импульсной катодолюминесценции полевых шпатов, нахождение особенностей в люминесцентных параметрах минерала одного и того же состава в зависимости от региона его происхождения.

Методика работы. Регистрировались спектры и кинетика полос импульсной катодолюминесценции полевых шпатов. Проводилось разложение полученных спектров в энергетических координатах на гауссоиды и находились соответствующие параметры разложения. Кинетические кривые, полученные при работе фотоэлектронного умножителя в «токовом режиме», деконволировались для нахождения истинной зависимости фототока от времени. На основе полученных данных проводился качественный люминесцентный анализ.

Результаты и их анализ. В работе исследовались три группы полевых шпатов. Первую группу составляли образцы однокомпонентных полевых шпатов (ортоклаз, адуляр, альбит, анортит), вторую и третью группу – двухкомпонентные K–Na шпаты (микроклин, амазонит, санидин) и Ca–Na шпаты (олигоклаз и лабрадор) соответственно. Показано, что разные виды полевых шпатов характеризуются своим набором люминесцирующих примесей. В них присутствуют полосы как собственной (AlO_4^{4-}, FeO_4^{4-}), так и примесной (Mn^{2+}, Fe^{3+}) люминесценции, имеющие характерные времена затухания. Исследование полевых шпатов одного и того же химического состава из каждой группы в зависимости от региона происхождения выявило отличие люминесценции полос по положению и по их кинетике.

Выводы. Результаты работы показывают возможность использования люминесцентных и кинетических измерений для неразрушающей диагностики однокомпонентных полевых шпатов (ортоклаз, альбит, анортит), разделения щелочных полевых шпатов от плагиоклазов, а также проведение люминесцентного статистического анализа для определения их регионов происхождения. Кроме того, данный метод может быть эффективен в экспресс-диагностике ювелирных вставок из «лунного камня» с идентификацией конкретного полевого шпата.

***Ключевые слова*:** импульсная катодолюминесценция, кинетика, полевые шпаты, регион происхождения.

Введение

Полевые шпаты – многоликая группа минералов, широко используемая человеком. Их кристаллическая структура имеет каркасный тип с чередующимися кремнекислородными и алюмокислородными тетраэдрами. Химический состав определяется отношением содержания компонентов в системе: $NaAlSi_3O_8$–$KAlSi_3O_8$–$CaAl_2Si_2O_8$. Сложное соотношение состава минерала, различная упорядоченность распределения алюминия и кремния по структурным положениям, возможность распада твердых растворов определяют существование множества разновидностей полевых шпатов. Однокомпонентными полевыми шпатами являются ортоклаз ($KAlSi_3O_8$), альбит ($NaAlSi_3O_8$) и анортит ($CaAl_2Si_2O_8$), а остальные представители имеют либо твердый раствор соединений $NaAlSi_3O_8$ и $KAlSi_3O_8$, тогда такие полевые шпаты относят к калий-натриевым или щелочным, либо имеют твердый раствор соединений $NaAlSi_3O_8$ и $CaAl_2Si_2O_8$, в этом случае полевые шпаты называют кальциево-натриевыми, или плагиоклазами [1–3].

Среди полевых шпатов есть виды, которые применяются в качестве ювелирных камней, в том числе благодаря оптическому эффекту иризации, который проявляется в виде радужного цветового сияния при ярком освещении. Поэтому в ювелирном деле они заняли свою отдельную нишу. Одним из самых красивых представителей, обладающих иризацией, является адуляр, или «лунный камень». Под этим же коммерческим названием могут продавать и другие самоцветы из группы полевых шпатов (беломорит, прозрачный микроклин), а также минералы, не относящиеся к полевым шпатам (халцедон). Кроме того,

✉plasma@iep.uran.ru
**rasuleva@iep.uran.ru
***popovm1@yandex.ru

имитации «лунного камня» делают из различных стекол и пластмасс. Следовательно, актуальной задачей является идентификация адуляра среди возможных его «аналогов лунного камня». Другой проблемой, которая встречается в ряде случаев, является необходимость оперативного и достоверного отличия подгруппы натриево-кальциевых и калиево-натриевых полевых шпатов, при этом интересной для геммологов представляется и проблема определения региона происхождения того или иного полевого шпата [4].

Для исследования полевых шпатов в данной работе используется импульсная катодолюминесценция (ИКЛ), которая возбуждается практически во всех минералах, физически способных люминесцировать по сравнению с другими известными видами возбуждения люминесценции. Данный метод является неразрушающим, чувствительным, информативным и экспрессным в плане простоты и скорости регистрации спектров люминесценции [5–9].

Таким образом, целью данной работы является изучение спектров и кинетики импульсной катодолюминесценции полевых шпатов, нахождение особенностей в люминесцентных параметрах минерала одного и того же состава в зависимости от региона его происхождения.

Экспериментальная аппаратура. Импульсная катодолюминесценция возбуждалась с помощью ускорителя электронов, генерирующего пучок со средней энергией 170 кэВ, плотностью тока 130 А/см^2, длительностью 2 нс. Образцы облучались в воздухе при комнатной температуре. Спектр люминесценции регистрировался многоканальным фотоприемником на базе ПЗС-линейки в диапазоне 350–900 нм. Спектральная информация усреднялась по 60 импульсам, что обеспечивало стабильность амплитудных параметров спектра камней не менее 90 %. При измерении кинетических характеристик использовался этот же источник возбуждения, но в качестве приемной аппаратуры выступали монохроматор МДР-41, ФЭУ-100 и ФЭУ-62. Сигнал с ФЭУ регистрировался осциллографом Keysight DSOX2014A. Абсолютная погрешность измерения длины волны во всех случаях не превышала 0,5 нм [10, 11].

Объекты исследования

Все объекты исследования были разделены на три группы. В первую группу вошли образцы ортоклаза и адуляра, альбита и анортита, относящиеся к однокомпонентным полевым шпатам. Двухкомпонентные K–Na полевые шпаты (микроклин, амазонит, санидин) составили вторую группу; Ca–Na образцы, представителями которых выступали олигоклаз и лабрадор, – третью группу. В каждой группе были образцы из нескольких регионов, для некоторых из них было известно месторождение. Исследовались образцы альбита из России с Южного (Тайгинское месторождение) и Среднего Урала (Горбуновское месторождение), а также из Бразилии; образцы амазонита – из России с Южного Урала (Ильменские горы) и Кольского полуострова (гора Плоская), а также из Бразилии; образцы лабрадора – из России с Южного Урала (Борзовское месторождение), Украины (Головинское месторождение) и Мадагаскара. В общей сложности было исследовано более 40 образцов полевых шпатов разных составов.

Результаты исследования и их обсуждение

К настоящему времени в полевых шпатах установлено несколько типов свечения. Во-первых, свечение примесных ионов при изоморфном замещении K, Na, Ca; во-вторых, примесный центр может образовываться при изоморфном замещении примеси катионов Al или Si; и в-третьих, люминесценция собственных полос, связанная с образованием центров рекомбинации, таких как SiO_4^{3-}, AlO_4^{4-}, которые являются одновременно и центрами излучения [12–17].

На рис. 1 приведены характерные спектры ИКЛ трех групп полевых шпатов, в том числе из разных регионов происхождения. С помощью математической программы проводилось разложение полос люминесценции в энергетических координатах на гауссоиды и находились соответствующие параметры разложения. Кинетические измерения проводились при работе фотоэлектронного умножителя в так называемом «токовом режиме», поэтому получаемый сигнал на осциллографе представлял собой свертку импульса фототока и аппаратной функции измерительной цепи. Для нахождения зависимости фототока от времени этот сигнал деконволировался с учетом всех параметров измерительной цепи. Результат этой процедуры приведен на рис. 2.

Здесь для примера приводятся несколько аппроксимированных кривых затухания люминесценции. Характерные кинетические времена τ_d определялись путем аппроксимации кривых спада, где линия регрессии была представлена экспоненциальной функцией. Относительная погрешность по определению времени затухания люминесценции полос не превышала 5 %. В табл. 1 сведены данные по положению характерных полос люминесценции и их кинетики в изучаемых полевых шпатах.

Сразу заметим существенное различие в люминесценции двухкомпонентных плагиоклазов и однокомпонентных альбита и анортита от щелочных полевых шпатов, включая ортоклаз. Различие проявляется в отсутствии инфракрасной полосы люминесценции (рис. 1). Наша фотоприемная аппаратура на основе ПЗС-линейки ограничена в длинноволновой части 900 нм, и соответственно в этой области на проявление полосы начинают сказываться граничные эффекты. Положение инфракрасных полос (табл. 1) приходится на длину волны 855 нм, что, скорее всего, не является достоверным, и ее положение должно изменяться в разных полевых шпатах [14]. Кинетические же параметры регистрировались с помощью ФЭУ-62 на длине волны 855 нм и далее, чтобы можно было найти точное положение максимума полосы. Однако во всех измерениях различие по времени не превышало указанной погрешности, а среднее время затухания люминесценции для разных образцов полевых шпатов составило 10–20 мкс. В табл. 1 мы внесли длину волны 855 нм, чтобы отразить факт наличия инфракрасной полосы. Другой вопрос – ее природа, которая до сих пор достоверно не установлена. Однако это качественное различие позволяет оперативно и достоверно отличить щелочные полевые шпаты от плагиоклазов.

В некоторых полевых шпатах присутствует примесная полоса излучения Mn^{2+} с длительным послесвечением, изменяющимся от 5 до 11 мс (табл. 1) [12–17]. В альбитах и олигоклазах люминесценция Mn^{2+} проявляется на длине волны 560 нм, в лабрадорах ее положение изменяется в зависимости от месторождения, также она сдвигается в длинноволновую область в образцах санидина. Смещение полос люминесценции может быть

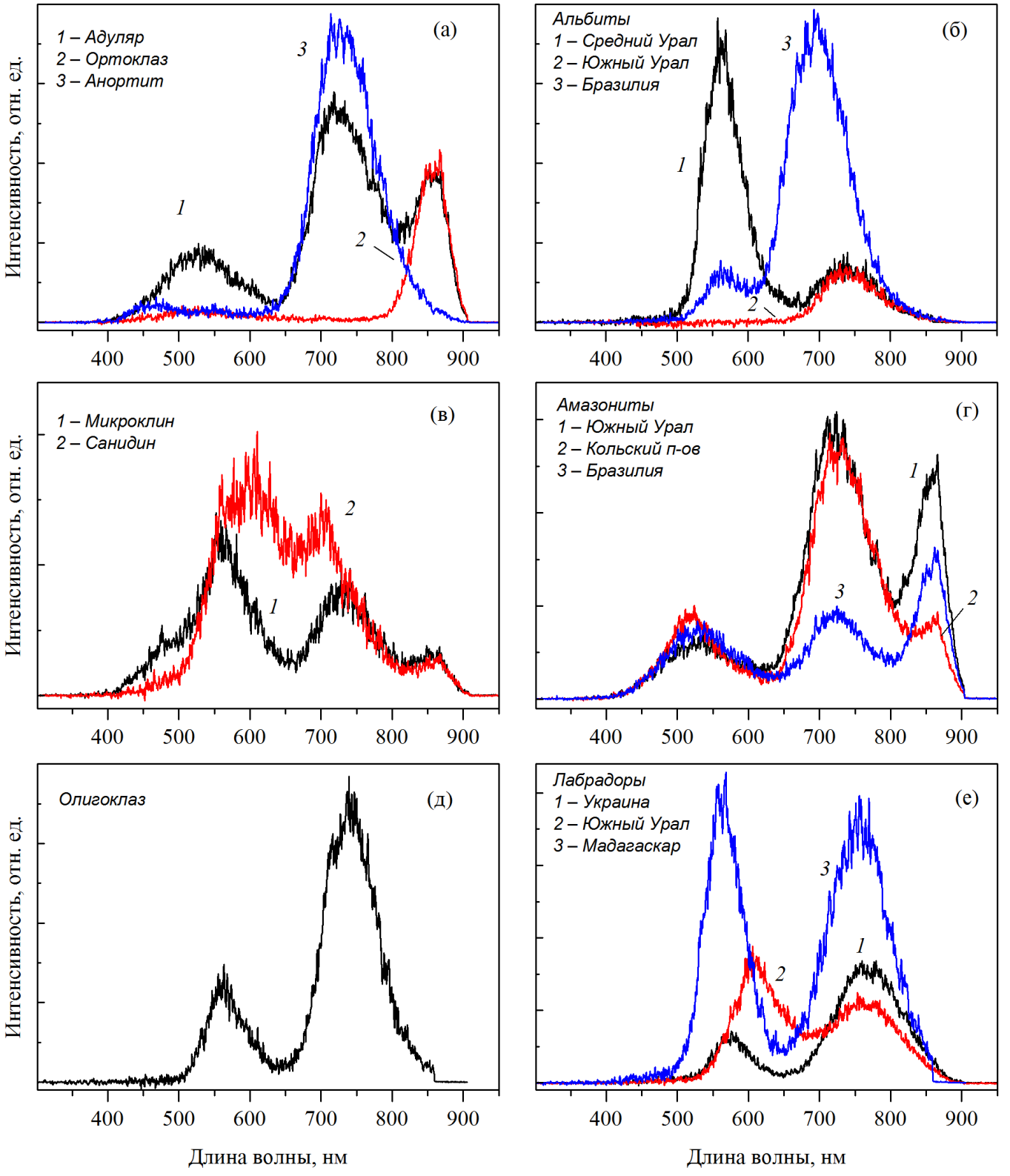

Рисунок 1. Спектры ИКЛ трех групп полевых шпатов: *а*, *б* – однокомпонентные шпаты; *в*, *г* – K–Na шпаты; *д*, *е* – Na–Ca шпаты
Figure 1. PCL spectra of three groups of feldspars: *a*, *b* – one-component spars; *c*, *d* – K–Na spars; *e*, *f* – Na–Ca spars

обусловлено разными причинами. Во-первых, влияние оказывает изменение силы кристаллического поля. Альбиты, олигоклазы и лабрадоры имеют одинаковую триклинную сингонию в отличие от санидина с моноклинной сингонией. Во-вторых, согласно диаграмме конфигурационных кривых, для иона Mn^{2+} активными излучательными уровнями являются $^4T_1$ и $^4T_2$ и, следовательно, смещение может быть обусловлено участием разных переходов. В-третьих, значительный сдвиг полосы может наблюдаться и тогда, когда кристаллическое поле и координационное число остаются постоянными, но при этом изменяется тип лигандов, приводящий к изменению длины и степени ковалентности химической связи. В нашем случае влияние на сдвиг в рассматриваемых

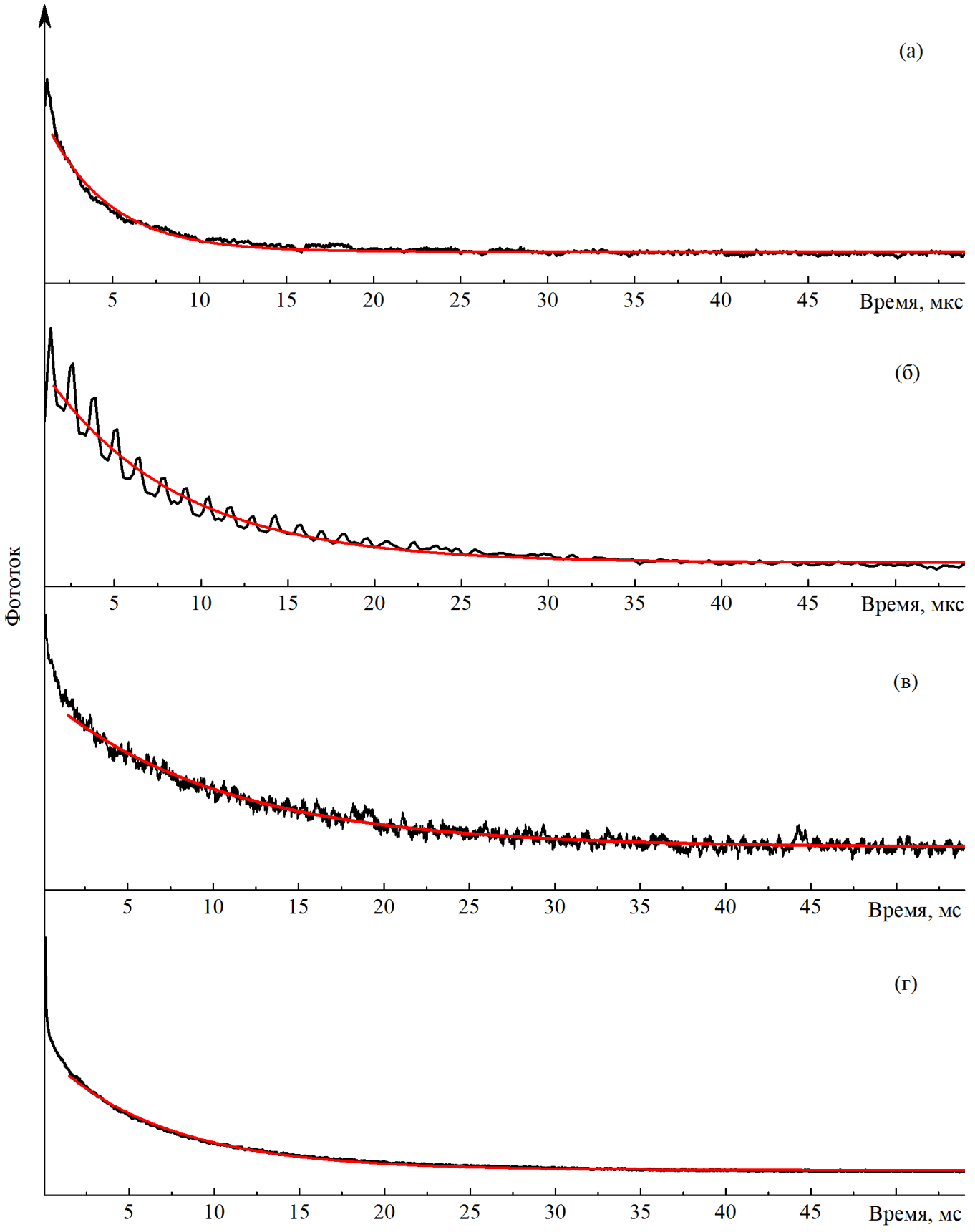

Рисунок 2. Характерные кинетические кривые для полос: *а* – 520 нм; *б* – 855 нм; *в* – 730 нм; *г* – 560 нм
Figure 2. Characteristic kinetic curves for bands: *a* – 520 nm; *b* – 855 nm; *c* – 730 nm; *d* – 560 nm

шпатах оказал не один конкретный фактор, а несколько. Мы видим изменение времени жизни излучательного уровня, по которому можно определить, какой из двух уровней является активным в люминесценции, но для этого необходимы другая выборка образцов и более точные измерения.

Таблица 1. Сводные данные по полосам люминесценции полевых шпатов с указанием ее характерного времени
Table 1. Summary data on the luminescence bands of feldspars with indication of luminescence characteristic time

Тип	Регион	λ	τ^d
	Однокомпонентные полевые шпаты		
Ортоклаз		520	8 мкс
		855	18 мкс
Адуляр		520	8 мкс
		730	1 мс
		855	15 мкс
Анортит		470	23 мкс
		730	0,5 мс
Альбит	Средний Урал,	560	11 мс
	Горбуновское	730	1 мс
	Южный Урал, *Тайгинское*	730	1 мс
	Бразилия	560	10 мс
		700	13 мс
	K–Na полевые шпаты		
Санидин		590	5 мс
		710	1 мс
		855	11 мкс
Микроклин		480	7,5 мкс
		560	9 мкс
		730	0,8 мс
		855	20 мкс
Амазонит	Южный Урал, *г. Миасс Ильменские горы*	520	30 мкс
		730	0,6 мс
		855	10 мкс
	Кольский п-ов, *г. Плоская*	520	5,5 мкс
		730	0,4 мс
		855	10 мкс
	Бразилия	520	4 мкс
		730	0,7 мс
		855	13 мкс
	Ca–Na полевые шпаты		
Олигоклаз		560	8 мс
		740	1 мс
Лабрадор	Мадагаскар	560	7 мс
		750	3 мс
	Южный Урал,	610	10 мс
	Борзовское	760	2 мс
	Украина,	575	9 мс
	Головинское	760	2 мс

Практически во всех полевых шпатах (за исключением ортоклаза) наблюдается полоса, связанная с излучением примесного иона Fe^{3+} в красной области ($^4T_1 \rightarrow {}^6A_1$) [12–17]. В группе однокомпонентных полевых шпатов люминесценция ионов Fe^{3+} наблюдается на длине волны 730 нм со временем жизни, не превышающим 1 мс, за исключением образцов альбита из Бразилии. У них полоса сдвинута в коротковолновую область, при этом характерное время достигает величины 13 мс. В двухкомпонентных K–Na шпатах (микроклин, амазонит) люминесценция также наблюдается на 730 нм, но время ее затухания меньше 1 мс. В образцах санидина «железная» полоса проявляется на 710 нм с характерным временем 1 мс. В плагиоклазах же красная полоса наблюдается в более длинноволновой области 740–760 нм с кинетикой люминесценции 1–3 мс. Видно, что положения абсолютного максимума полосы Fe^{3+} и соответствующие характерные времена отличаются от образца к образцу. Излучательный уровень $^4T_1$ очень сильно зависит от кристаллического поля, в которое помещен ион железа и, следовательно, на положение полосы будут влиять степень упорядоченности решетки и распределение примеси железа по позициям Al и Si, причем более коротковолновые полосы связывают с центром, где Fe^{3+} замещает Si^{4+}, а более длинноволновые полосы связывают с замещением $Fe^{3+} \rightarrow Al^{3+}$ [12].

Кроме примесных полос в некоторых полевых шпатах проявляется люминесценция собственного центра AlO_4^{4-}. Она изучена в алюмосиликатных минералах [12, 14]. Образование этой полосы происходит за счет стабилизации дырки на одном из атомов кислорода алюмокислородных тетраэдров с последующей компенсацией избыточного заряда. Так, в микроклине и анортите проявляются слабоинтенсивные полосы с максимумами при 480 и 470 нм соответственно, однако с отличающимися характерными временами затухания в 3 раза. Из табл. 1 видно, что в микроклине есть еще одна полоса излучения на длине волны 560 нм, которую мы не отнесли к излучению Mn^{2+}, хотя в литературе ее связывают с излучением этого иона [12–14]. Во всех исследованных нами микроклинах время затухания люминесценции этой полосы имеет среднее значение 9 мкс, что на три порядка меньше типичного значения времени, наблюдаемого для запрещенных электронных переходов марганцевых полос. Данную люминесценцию мы связываем также с излучением анионного комплекса, только в качестве катионов в нем выступают атомы железа FeO_4^{4-}, которые замещают атомы Al^{3+}. Время жизни полосы на длине волны 560 нм практически такое же, как и у анионного комплекса AlO_4^{4-}. Если анализировать группу амазонитов, которые являются разновидностью микроклина, то в них отсутствует собственная полоса в синей области, но проявляется симметричная полоса на длине волны 520 нм, ширина которой практически в два раза превышает ширину синей полосы и полосы при 560 нм. Характерные времена зеленой люминесценции составляют несколько микросекунд для амазонитов с Кольского полуострова и Бразилии и 30 мкс – для образцов с Южного Урала. Скорее всего, люминесценция на 520 нм может быть результатом суперпозиции полос, образованных двумя типами электронно-дырочных центров AlO_4^{4-} и FeO_4^{4-}. Эта же полоса проявляется в адуляре и ортоклазе, причем в последнем она проявляется очень слабо, скорее всего, из-за малого содержания электронно-дырочных центров, образованных в том числе при участии железа, о чем свидетельствует отсутствие его излучения в красной области. В адуляре же полосы при 520 нм и 730 нм являются интенсивными, а время затухания люминесценции собственной полосы одинаково в обоих полевых шпатах и составляет 8 мкс (табл. 1).

Люминесценция полевых шпатов в зависимости от региона происхождения (табл. 1) отличается и по положению, и по кинетике полос, но для такого полноценного исследования требуется другое количество

образцов, как, например, в работе [8], необходимое для проведения статистического анализа.

Таким образом, каждая группа полевых шпатов характеризуются своим набором люминесцирующих примесей с характерными временами затухания. Исследования показали, что с помощью ИКЛ можно диагностировать неразрушающим способом однокомпонентные полевые шпаты, отделять щелочные полевые шпаты от плагиоклазов, а также данный метод может быть эффективен в экспресс-диагностике ювелирных вставок из «лунного камня» с идентификацией конкретного полевого шпата.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, грант № 20-08-00018.

ЛИТЕРАТУРА

1. Deer W. A., Howie R. A., Zussman J. An Introduction to the Rock-forming Minerals. London: Longmans, 1962. 528 p.
2. Каменцев И. Е., Сметанникова О. Г. Рентгенография основных типов породообразующих минералов (слоистые и каркасные силикаты). Л.: Недра, 1983. 245 с.
3. Минералогическая энциклопедия / под ред. К. Фрея; пер. с англ. Л.: Недра, 1985. 512 с.
4. Методические указания по поискам и перспективной оценке месторождений цветных камней. Амазонит и амазонитовые породы. М.: Мингео СССР, ВПО «Союзкварцсамоцветы», 1978. Вып. 19. 54 с.
5. Соломонов В. И., Осипов В. В., Михайлов С. Г. Импульсно-периодическая катодолюминесценция апатита // Журнал прикладной спектроскопии. 1993. Т. 59. № 1-2. С. 107–113.
6. Соломонов В. И. Анизотропия импульсной катодолюминесценции кристаллов кварца // Журнал прикладной спектроскопии. 1994. Т. 60. № 3-4. С. 281–285.
7. Соломонов В. И., Липчак А. И., Михайлов С. Г. Импульсная катодолюминесценция – новый метод анализа конденсированных веществ // Аналитика и контроль. 1998. № 1(3). С. 8–15.
8. Соломонов В. И., Спирина А. В., Попов М. П., Иванов М. А., Липчак А. И. Статистический люминесцентный метод определения региона происхождения изумрудов // Оптический журнал. 2019. Т. 86. № 7. С. 67–73. https://doi.org/10.17586/1023-5086-2019-86-07-67-73
9. Соломонов В. И., Спирина А. В., Попов М. П., Макарова А. С., Николаев А. Г., Орлов А. Н. Оптические свойства нового ювелирно-поделочного камня – райизита // Оптический журнал. 2021. Т. 88. № 10. С. 610–614. https://doi.org/10.1364/JOT.88.000610
10. Solomonov V. I., Michailov S. G., Lipchak A. I., Osipov V. V., Shpak V. G., Shunailov S. A., Yalandin M. I., Ulmaskulov M. R. CLAVI Pulsed Cathodoluminescence Spectroscope // Laser Physics. 2006. Vol. 16. No. 1. P. 126–129. https://doi.org/10.1134/S1054660X06010117
11. Соломонов В. И., Спирина А. В., Макарова А. С. Разгорание и затухание импульсной катодолюминесценции в монокристаллах и керамиках Nd:ИАГ // Оптика и спектроскопия. 2021. Т. 129. Вып. 9. С. 1018–1022. https://doi.org/10.1134/S0030400X21070183
12. Таращан А. Н. Люминесценция минералов. Киев: Наукова думка, 1978. 296 с.
13. Горобец Б. С., Рогожин А. А. Спектры люминесценции минералов: справочник. М.: ВИМС, 2001. 312 с.
14. Полисадова Е. Ф. Люминесценция кристаллов с оксианионами и оксидных стекол при возбуждении импульсами потока электронов: дис. … д-ра физ.-мат. наук. Томск: ТПУ, 2017. 363 с.
15. Gaft M., Reisfeld R., Panczer G. Luminescence Spectroscopy of Minerals and Materials. Berlin, Heidelberg, N. Y.: Springer-Verlag, 2005. 356 p.
16. Бахтерев В. В. Электропроводность некоторых плагиоклазов при температурах в земной коре и их импульсная катодолюминесценция (в связи с их генезисом) // Уральский геофизический вестник. 2015. № 2(26). С. 4–12.
17. Жиличева О. М. Люминесцентные свойства минералов по данным импульсной катодолюминесценции: дис. … канд. геол.-минерал. наук. М.: ИГЕМ РАН, 2010. 145 с.

Статья поступила в редакцию 01 июля 2022 года

УДК 535.37, 549.02 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2022-3-21-27

Luminescent characteristics of feldspars

Vladimir Ivanovich SOLOMONOV[1,2*]
Al'phiya Vilikovna SPIRINA[1**]
Mikhail Petrovich POPOV[3,4***]
Anna Sergeevna MAKAROVA[1]

[1]Institute of Electrophysics of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia
[2] Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia
[3]Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia
[4]The Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

Abstract

The purpose of the work – study of the pulsed cathodoluminescence spectra and kinetics of feldspars, determination of features in the luminescent parameters of minerals of the same composition, depending on their deposits.

Research methodology. The spectra and band kinetics of feldspar pulsed cathodoluminescence were recorded. The resulting spectra were decomposed into gaussoids in energy coordinates and the corresponding decomposition parameters were found. The kinetic curves obtained when the photomultiplier tube was operated in the "current mode" were deconvoluted to find the true dependence of the photocurrent on time. Based on the data obtained, a qualitative luminescent analysis was carried out.

Results and their analysis. Three groups of feldspars were studied in this work. The first group consisted of samples of one-component feldspars (orthoclase, adularia, albite, anorthite), the second and third groups included two-component K–Na spars (microcline, amazonite, sanidine) and Ca–Na spars (oligoclase and labradorite), respectively. It is shown that different types of feldspars are characterized by their own set of luminescent impurities. They contain bands of both intrinsic (AlO_4^{4-}, FeO_4^{4-}) and impurity (Mn^{2+}, Fe^{3+}) luminescence, which have characteristic decay times. The study of feldspars of the same chemical composition from each group, depending on the deposit, revealed the difference in the position of the luminescence bands and their kinetics.

Conclusions. The results of the work show the feasibility of using luminescent and kinetic measurements for non-destructive diagnostics of one-component feldspars (orthoclase, albite, anorthite), separation of alkali feldspars from plagioclases, as well as conducting luminescent statistical analysis to determine their deposits. In addition, this method can be effective at express diagnostics of "moonstone" jewelry inclusions with the identification of a certain feldspar.

***Keywords*:** pulsed cathodoluminescence, kinetics, feldspars, deposit.

REFERENCES

1. Deer W. A., Howie R. A., Zussman J. 1962, An Introduction to the Rock-forming Minerals. London: Longmans, 528 p.
2. Kamentsev I. E., Smetannikova O. G. 1983, Radiography of the main types of rock-forming minerals (layered and framework silicates). Leningrad, 245 p. (*In Russ.*)
3. 1985, Mineralogical Encyclopedia: ed. by Frey K., trans. from English. Leningrad, 512 p. (*In Russ.*)
4. 1978, Guidelines for prospecting and prospective evaluation of deposits of colored stones. Amazonite and amazonite rocks. Moscow, issue 19, 54 p. (*In Russ.*)
5. Solomonov V. I., Osipov V. V., Mikhailov S. G. 1993, Repetitively-pulsed cathodoluminescence of apatite. *Journal prikladnoy spectroscopii*, vol. 59, no. 1-2, pp. 107–113. (*In Russ.*)
6. Solomonov V. I. 1994, Anisotropy of pulsed cathodoluminescence of quartz crystals. *Journal prikladnoy spectroscopii*, vol. 60, no. 3-4, pp. 281–285. (*In Russ.*)
7. Solomonov V. I., Lipchak A. I., Mikhailov S. G. 1998, Pulsed cathodoluminescence – a new method for the analysis of condensed matter. *Analitika i control',* no. 1(3), pp. 8–15. (*In Russ.*)
8. Solomonov V. I., Spirina A. V., Popov M. P., Ivanov M. A., Lipchak A. I. 2019, Statistical luminescent method for determining the region of origin of emeralds. *Opticheskiy journal*, vol. 86, no. 7, pp. 67–73. (*In Russ.*) https://doi.org/10.17586/1023-5086-2019-86-07-67-73
9. Solomonov V. I., Spirina A. V., Popov M. P., Makarova A. S., Nikolaev A. G., Orlov A. N. 2021, Optical properties of a new decorative stone-rayizite. *Journal of Optical Technology*, vol. 88, issue 10, pp. 610–614. https://doi.org/10.1364/JOT.88.000610
10. Solomonov V. I., Michailov S. G., Lipchak A. I., Osipov V. V., Shpak V. G., Shunailov S. A., Yalandin M. I., Ulmaskulov M. R. 2006, CLAVI Pulsed cathodoluminescence spectroscope. *Laser Physics*, vol. 16, no. 1, pp. 126–129. https://doi.org/10.1134/S1054660X06010117
11. Solomonov V. I., Spirina A. V., Makarova A. S. 2021, Rise and decay of pulsed cathodoluminescence in Nd:YAG single crystals and ceramics. *Optics and Spectroscopy*, vol. 129, issue 9, pp. 1018–1022. https://doi.org/10.1134/S0030400X21070183
12. Tarashchan A. N. 1978, Luminescence of Minerals. Kiev, 296 p. (*In Russ.*)
13. Gorobets B. S., Rogozhin A. A. 2001, Luminescence spectra of minerals: Handbook. Moscow, 312 p. (*In Russ.*)
14. Polisadova E. F. 2017, Luminescence of crystals with oxyanions and oxide glasses when excited by electron beam pulses: Thesis for the degree of Doctor of Physical and Mathematical Sciences. Tomsk, 363 p. (*In Russ.*)
15. Gaft M., Reisfeld R., Panczer G. 2005, Luminescence Spectroscopy of Minerals and Materials., Berlin, Heidelberg, N. Y.: Springer-Verlag, 356 p.
16. Bakhterev V. V. 2015, Electrical conductivity of some plagioclases at temperatures in the earth's crust and their pulsed cathodoluminescence (in connection with their genesis). *Ural'skiy geophysicheskiy vestnik*, no. 2 (26), pp. 4–12. (*In Russ.*)
17. Zhilicheva O. M. 2010, Luminescent properties of minerals according to pulsed cathodoluminescence data: Thesis for the degree of Candidate of Geological and Mineralogical Sciences. Moscow, 145 p. (*In Russ.*)

The article was received on July 1, 2022

✉plasma@iep.uran.ru
**rasuleva@iep.uran.ru
***popovm1@yandex.ru