УДК 550.8:553.08:53/54

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ НЕКОТОРЫХ ПЛАГИОКЛАЗОВ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ В ЗЕМНОЙ КОРЕ И ИХ ИМПУЛЬСНАЯ КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ (В СВЯЗИ С ИХ ГЕНЕЗИСОМ)

Бахтерев В.В. – Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация. Исследована электропроводность и импульсная катодолюминесценция некоторых образцов плагиоклазов (лабрадоров) из горных пород Урала и Украинского кристаллического щита. Получены температурные зависимости электрического сопротивления в интервале температур 20–800 ºС. Определены электрические параметры E_o и $\lg R_o$ исследованных образцов и установлен характер их распределения. Выявлены три группы лабрадоров, различающихся по электрическим параметрам. Для этих же образцов получены спектры импульсной катодолюминесценции. Результаты сопоставлены. Принимая во внимание данные, опубликованные другими авторами (Жиличева, 2010), показана связь между интенсивностью катодолюминесценции собственных центров и возрастом пород, из которых образцы были собраны.

Электрические параметры, высокая температура, импульсная катодолюминесценция, плагиоклаз (*лабрадор*).

THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF SOME PLAGIOCLASE AT A TEMPERATURE IN THE EARTH'S CRUST, AND PULSE CATHODOLUMINESCENCE (IN RELATION TO THEIR GENESIS)

Bakhterev V.V. - Institute of Geophysics, UB of RAS, Yekaterinburg

Abstract. We investigated the electrical conductivity and pulsed cathodoluminescence plagioclases (labradors) from rocks of the Urals and the Ukrainian crystalline shield. The experiments allowed to establish dependence of electrical resistance on temperature in the range of 20–800 °C, parameters of high-temperature resistance $\lg R_o$, E_o for the tested samples; character of distribution of these parameters. Three types of Labradors were revealed. Labradors different in electrical parameters. For these samples were obtained spectra of pulsed cathodoluminescence. The results are compared. Taking into account the data published by other authors (Zhilicheva, 2010), shows the relationship between the intensity of cathodoluminescence own centers and the age of the rocks from which the samples were collected.

The electric parameters, high temperature, pulse cathodoluminescence, plagioclase. (*labrador*).

Введение

Разработка новых методов разведки, использование при этом различных геофизических полей и их интерпретации для изучения глубинного строения и состава Земной коры, требует всестороннего познания физических свойств минерального вещества в широком температурном диапазоне (20–800 ºС и более), чем и обусловлен постоянный интерес к подобным исследованиям.

Плагиоклазовые минералы, имея общую кристаллохимическую формулу $Na\,[AlSi_3O_8]$ – $Ca[Al_2Si_2O_8]$, представляют непрерывный изоморфный ряд с неограниченной смесимостью. Плагиоклазы являются триклинными минералами. Некоторые из них (альбит, анортит и др.) имеют по несколько, близких друг к другу, структурных разновидностей, но все же различающихся между собой метрикой и симметрией решетки (Дир и др., 1966). Кристаллохимические особенности связаны с изоморфным замещением Ca^{2+} ионами Mn^{2+} и Al^{3+} – ионами Fe^{3+}, дефектами кристаллической структуры. Эти различия отражают условия образования плагиоклазов и проявляются в своеобразии физических свойств.

В научной литературе опубликовано огромное количество работ по полевым шпатам, в том числе крупных обобщений, например (Грэй и Тейлор, 1956; Коул и др., 1956; Марфунин, 1962; Кумеев, 1982). Тем не менее, проблема типоморфизма полевых шпатов не теряет своей актуальности.

Появление новых физических методов стимулирует новые исследования. Среди них – электропроводность при высоких температурах и импульсная катодолюминесценция (Бахтерев, 2008а; Соломонов, Михайлов, 2003).

Исследования люминесцентных свойств плагиоклазов многочисленны, но они выполнены в основном способами, основанными на фотовозбуждении (Горобец, Рогожин, 2001; Морошкин и др., 2001). Кроме того, используются катодное и рентгеновское возбуждение, а также явления термо-, хеми-, электро- и радиолюминесценции. Однако все перечисленные методы возбуждения характеризуются одним существенным общим недостатком – сравнительно низкой интенсивностью люминесценции (Таращан, 1978; Горобец, Рогожин, 2001). Поэтому люминесцентные исследования применяются для фундаментального изучения структуры твердых тел и только частично используются для их прикладного анализа, в том числе при поисках, разработке и обогащении полезных ископаемых.

Результаты теоретических исследований и выполненных экспериментов показывают, что интенсивность импульсной катодолюминесценции (ИКЛ) на 5–6 порядков превышает интенсивность люминесценции, возбуждаемой традиционными методами (Соломонов, Михайлов, 2003). Установлено, что ИКЛ полевых шпатов имеет для всех разновидностей минералов много общих признаков: одинаковый набор полос ИКЛ. Однако соотношение полос в спектре ИКЛ индивидуально для минералов различного происхождения (Морошкин и др., 2005).

Сведения о температурной зависимости электрических параметров полевых шпатов весьма ограничены (Иоффе, Янчевская, 1958; Пархоменко, 1989; Бахтерев, 2008б; 2009).

Цель настоящей работы – выполнить совместные исследования температурной зависимости электрического сопротивления и импульсной катодолюминесценции коллекции образцов лабрадоров, собранных из горных пород Урала и Украинского кристаллического щита. При этом, имея в виду утверждение М.А. Садовского, что «необходим комплекс знаний о предмете. Совместное использование в анализе даже мало точных данных различной природы оказывается более выгодным и эффективным, чем повышение точности какой-либо однородной группы данных» (Садовский, 1968, с. 59).

Методика исследований и образцы

Методика определения электропроводности образцов горных пород и электрических параметров при высоких температурах описана ранее (Бахтерев, 2008б; 2009). Образцы для исследований вырезали в форме кубика с ребром 0,02 м. Измерения выполнены в открытой системе при атмосферном давлении. Электрическое сопротивление измеряли двухэлектродной установкой через каждые 10 градусов в интервале температур 20–800 °С. Скорость нагревания 0,066 град/с. Температуру в системе определяли платино-платинородиевой термопарой в 0,01 м от образца. Измерения электрического сопротивления осуществляли при постоянном напряжении. Прибор для измерения электрического сопротивления на постоянном токе – тераомметр Е6-13 с динамическим диапазоном от 10 до 10^{14} Ом и пределами допустимой относительной погрешности измерений от ±2,5 до 4 % в конце диапазона.

Исследования импульсной катодолюминесценции выполнены на созданной и функционирующей в Институте электрофизики УрО РАН уникальной компьютеризированной установке «КЛАВИ» (Соломонов, Михайлов, 2003). Простота подготовки пробы к анализу и высокая яркость люминесценции позволяет проводить регистрацию ее спектра во всем диапазоне (350–850) нм в течение времени порядка 1 мин.

Исследовано 24 образца лабрадоров: 8 образцов лабрадоров из горных пород Украинского кристаллического щита, остальные 16 – из горных пород Урала. Для четырех образцов лабрадоров в табл. 1 приведен химический состав, электрические и люминесцентные параметры. Химический

анализ лабрадоров выполнен в аналитической лаборатории ОАО «Уралмеханобр» (Г.А. Куприянова), люминесцентный анализ – в Институте электрофизики УрО РАН (В.И. Соломонов).

Высокотемпературная электропроводность лабрадоров

Для всех исследованных образцов получены температурные зависимости электрического сопротивления в интервале 20–800 °С. На рис. 1 в качестве примера приведены типичные кривые $\lg R = f(T)$ исследованных образцов, а на рис. 2 – связь между E_o и $\lg R_o$ всех лабрадоров. Остальные результаты даны в табл. 1 и 2.

По величине электрического сопротивления при нормальной температуре все лабрадоры (украинские и уральские) различаются примерно на два порядка. С повышением температуры сопротивление

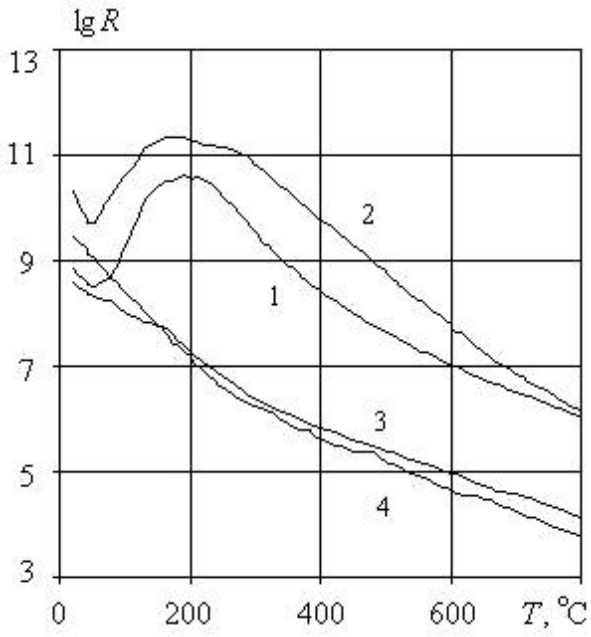

Рис. 1. Температурные зависимости электрического сопротивления лабрадоров 1, 2, 3, 4, описанных в табл. 1

Таблица 1. Химический состав, электрические и люминесцентные параметры лабрадоров

Параметр		Номер образца			
		1, 1а	2	3	4
Массовая доля, %	Al_2O_3	31,7	32,2	26,8	24,3
	CaO	10,9	16,6	9,56	8,56
	MgO	0,65	1,07	2,21	2,85
	Fe_2O_3	0,74	1,08	5,38	5,16
	K_2O	0,51	0,04	1,02	0,84
	Na_2O	4,28	2,20	3,97	4,08
	SiO_2	50,1	45,5	49,9	52,8
	TiO_2	0,15	0,03	0,34	0,30
	П.П.П.	0,53	0,92	0,31	0,73
	Σ	99,56	99,6	99,4	99,52
Электрические параметры	E_o, эВ	0,66 (1); 0, 8 (1а)	1,35	0,91	О,61
	$\lg R_o$	2,73 (1); 2,1 (1а)	-1,45	0,62	0,61
Отношение интенсивностей ИКЛ $I(Fe^{3+})/I(Mn^{2+})$		4,67 (1); 2,14 (1а)	1,17	4,5	2,6
Место отбора образца		Украинский кристаллический щит (на рис. 2 ряд I)	Урал (на рис. 2 ряд II)	Урал (на рис. 2 ряд III)	Урал (на рис. 2 ряд III)

всех исследованных украинских и части уральских лабрадоров растет, достигает максимального значения при 200 °С (см. рис. 1, кривые 1, 2). В интервале 200–800 °С электрическое сопротивление плавно уменьшается примерно на пять порядков от максимального значения. Характер температурных зависимостей этих лабрадоров одинаковый. При этом электрическое сопротивление украинских лабрадоров примерно на порядок выше уральских во всем температурном интервале.

Другая часть образцов уральских лабрадоров существенно отличается по величине и характеру температурных зависимостей сопротивления (см. рис. 1, кривые 3, 4). Электрическое сопротивление этих лабрадоров плавно уменьшается с ростом температуры и на три-два порядка ниже остальных плагиоклазов в температурном интервале 200–800 °С, уменьшается при 800 °С примерно на четыре-пять порядков от максимального значения.

На рис. 2 показана связь между энергией активации и коэффициентом электрического сопротивления исследованных образцов лабрадоров. Для исследованных образцов энергия активации меняется от 0,5 до 1,6 эВ; коэффициент электрического сопротивления $\lg R_o$ – от -3 до 3 (табл. 2). Группа образцов украинских и часть уральских (ряды I и II) как бы «сформировала» в координатах E_o и $\lg R_o$ прямую $\lg R_o = a - b\,E_o$. Корреляционное уравнение имеет вид $\lg R_o = 6{,}54 - 5{,}75 E_o$, $R^2 = 0{,}99$.

Другая часть уральских лабрадоров (ряд III) выпадает из этой зависимости. По результатам химического анализа эти лабрадоры («аномальные») отличаются от ос-

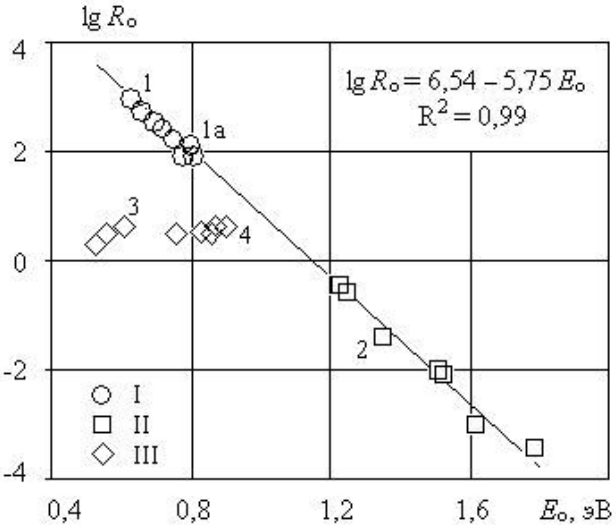

Рис. 2. Связь между E_o и $\lg R_o$ исследованных образцов лабрадоров. Ряд I – лабрадоры из горных пород Украинского кристаллического щита; ряды II и III – уральские лабрадоры. Цифры около некоторых точек – номера образцов лабрадоров, описанных в табл. 1 и 2. Прямая линия – корреляция $\lg R_o = f(E_o)$ исследованных образцов лабрадоров за исключением лабрадоров ряда III

Таблица 2. Параметры электропроводности исследованных лабрадоров

Место отбора образца	Параметр	
	E_o	$\lg R_o$
Украинский щит (на рис. 2 ряд I)	0,63–0,81	2,84–1,9
Урал (на рис. 2 ряд II)	1,23–1,62	(-0,48)–(-3)
Урал (на рис. 2 ряд III)	0,53–0,90	0,61–0,31

тальных («нормальных») содержанием всех оксидов, особенно оксида железа (см. табл. 1).

В связи с этим сошлемся на результаты исследований структуры плагиоклазов. А именно изменения, связанные с упорядочением Al и Si, в структуре анортитового типа. В работе (Грэй и Тейлор, 1956) отмечены наблюдения над некоторыми «аномальными» плагиоклазами.

Показано, что лабрадор, содержащий 5 % ортоклаза, 33 % альбита и 62 % анортита, от которого следовало бы ожидать структуры типа «структуры средних плагиоклазов», в действительности обнаружил пример плагиоклаза с анортитовой структурой, в котором распределение Al и Si далеко от полного порядка. Авторы полагают, что неупорядоченное состояние в этом образце лабрадора может быть следствием ряда причин: или значительным неравенством числа атомов Al и Si, или влиянием небольшого количества присутствующих в нем атомов K, или следствием замещения Ca атомами Na. Полученные нами результаты не противоречат данному утверждению. По всем отмеченным в ра-

боте (Грэй и Тейлор, 1956) параметрам исследованные нами «аномальные» лабрадоры отличаются от «нормальных» лабрадоров.

Импульсная катодолюминесценция лабрадоров

На рис. 3 приведены типичные спектры ИКЛ исследованных лабрадоров. В спектрах ИКЛ выделены две интенсивные широкие полосы. Одним из центров люминесценции является Mn^{2+}, изоморфно замещающий Ca^{2+}. В спектре наблюдается широкая полоса люминесценции Mn^{2+} с центром тяжести на длине волны λ = (569–576) нм. Другим центром люминесценции является Fe^{3+}, изоморфно замещающий Al^{3+} с центром тяжести на длине волны λ = (750–764) нм. Эти линии присущи всем исследованным образцам. При этом интенсивность полос и их соотношение для разных образцов различны (см. рис. 3, табл. 1).

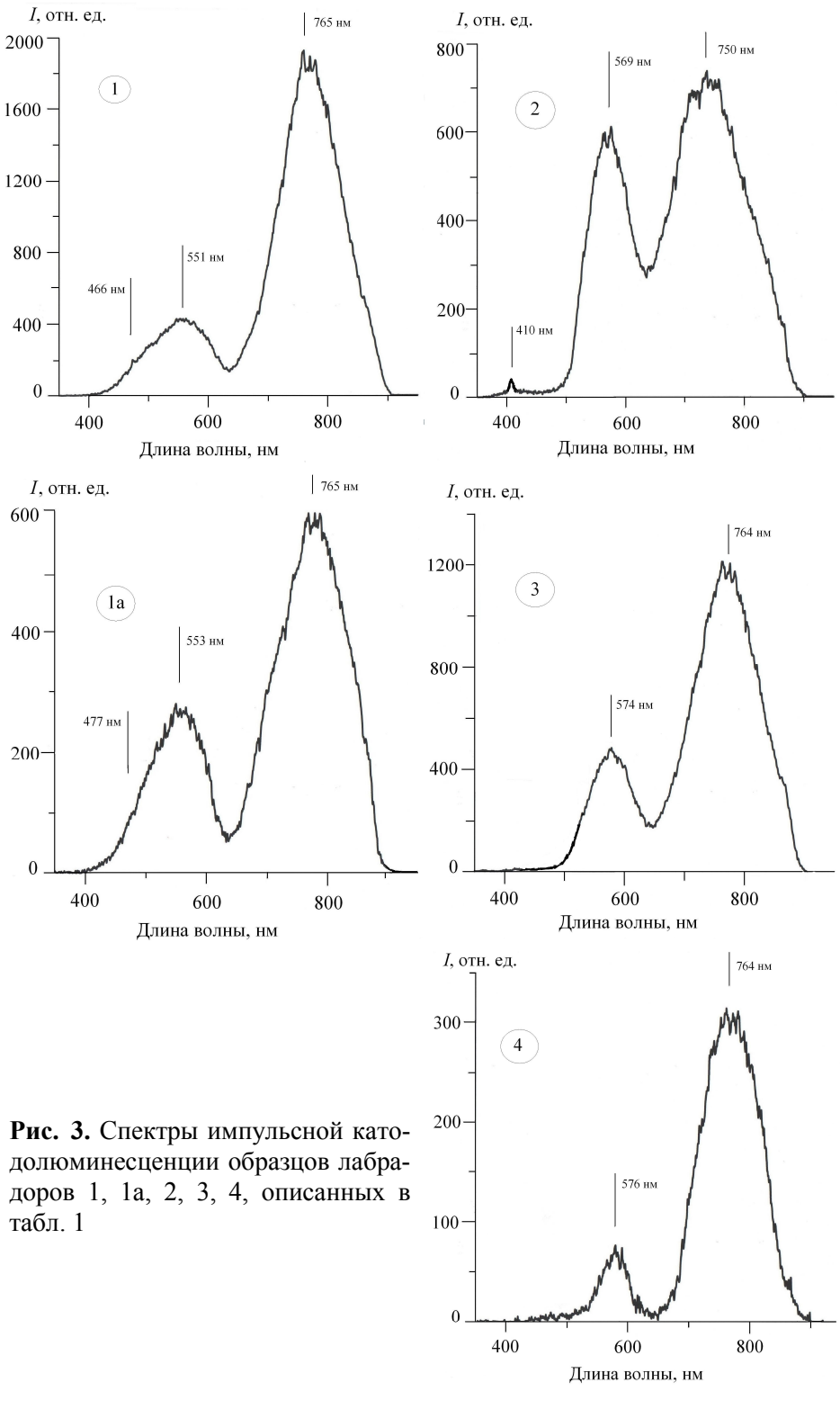

Рис. 3. Спектры импульсной катодолюминесценции образцов лабрадоров 1, 1а, 2, 3, 4, описанных в табл. 1

В спектрах всех украинских образцов лабрадоров, кроме двух полос на длинах волн λ = (569–576) нм и λ = (750–764) нм, присущих всем образцам лабрадоров, присутствует слабо выраженная полоса на λ = (466–477) нм. Возможно, она связана с (Eu^{2+} + O*) (см. рис. 3, кривые 1, 1а). В некоторых спектрах люминесценции уральских образцов выделена очень слабая узкая полоса с центром при λ = 410 нм (см. рис. 3, кривая 2). Эта полоса может быть связана с кислородными дырочными радикалами типа O* – собственными структурными дефектами в кремнекислородной подрешетке (Лютоев и др., 2007), а может быть с изоморфной примесью Eu^{2+}. Эту полосу раньше мы наблюдали при

исследовании ИКЛ флюоритов (Бахтерев и др., 1998).

В.В. Морошкин с соавторами (Морошкин и др., 2005) при изучении плагиоклазов из пород Балтийского кристаллического щита в рентгенолюминесценции (РЛ) наблюдали излучение Mn^{2+}, Fe^{3+}, (Eu^{2+} + O*) (с центром тяжести на длинах волн, соответственно, 550–570, 710–760, 450 нм). Сравнивая полученные данные со спектрами ИКЛ, установили, что в спектрах ИКЛ наблюдаются те же центры свечения и закономерности их распределения. В архейских породах проявлены в основном дефектные электронно-дырочные центры, ответственные за проявление экситонных полос, в то время как люминесценция примесей-люминофоров очень слаба.

В спектрах люминесценции плагиоклазов прослеживаются различия, которые выражаются в изменении яркости свечения, количестве и относительной интенсивности выявленных полос, в зависимости от возраста пород. Для спектров ИКЛ плагиоклазов из архейских пород характерна сильная полоса кислородсодержащего центра O* и слабые полосы Fe^{3+}, Mn^{2+}. Спектры ИКЛ плагиоклазов из раннепротерозойских пород отличаются более интенсивными полосами Mn^{2+} и слабыми – (Eu^{2+} + O*), Fe^{3+}. Характер спектров ИКЛ плагиоклазов из среднепротерозойских пород схож со спектрами ИКЛ плагиоклазов из раннепротерозойских пород. В них присутствуют полосы (Eu^{2+} + O*), Mn^{2+}, Fe^{3+}. Основное их различие состоит в присутствии более сильных полос Fe^{3+}. В спектрах ИКЛ плагиоклазов из позднепротерозойских пород зафиксировано доминирование полос Fe^{3+} и снижение интенсивностей полос Mn^{2+}, (Eu^{2+} + O*) (Жиличева, 2010).

В.П. Лютоев с соавторами (Лютоев и др., 2007) изучали плагиоклазы из архейских пород разреза Кольской сверхглубокой скважины СГ-3 РЛ. Обнаружили спектры РЛ, представленные суперпозицией полос изоморфных примесей Mn^{2+}, Fe^{3+} и собственных кислородных центров O* в кремне- и алюмокислородных тетраэдрах. РЛ: Mn^{2+} – 560 нм, Fe^{3+} – 750 нм, полоса в области 410–420 нм связана с кислородными дырочными радикалами типа O* – собственными структурными дефектами в кремнекислородной подрешетке. Аналогичные O*-центры в тетраэдрах с замещенными кремнием на алюминий (AlO_4-центры) обусловливают появление полосы с максимумом РЛ в области 460–480 нм.

Образование собственных дефектов тесно связано с дислокационно-метаморфическими преобразованиями. Так что люминесценция собственных дефектов отражает степень проявления деформации (Борозновская, Быдтаева, 2004).

В табл. 3 и на рис. 4 с использованием материалов О.М. Жиличевой (Жиличева, 2010) и собственных исследований показана связь интенсивности излучения ИКЛ собственных дефектов минералов с возрастом пород, из которых собраны образцы. Выявлена

Таблица 3. Люминесцентная характеристика некоторых образцов олигоклаза и лабрадора

Минерал	*I*, отн.ед. полосы ИКЛ Eu^{2+} + O*	Возраст пород, из которых отобран образец	Место отбора образца	Литературный источник
Олигоклаз	8000	Архей	Балтийский щит	Жиличева, 2010
Олигоклаз	4200	Ранний протерозой		
Олигоклаз	3000	Средний протерозой		
Олигоклаз	1100	Поздний протерозой		
Лабрадор	200	Докембрий	Украинский щит	Исследования автора
Лабрадор	100	Докембрий		
Лабрадор	30	Палеозой	Урал	
Лабрадор	0	Палеозой		

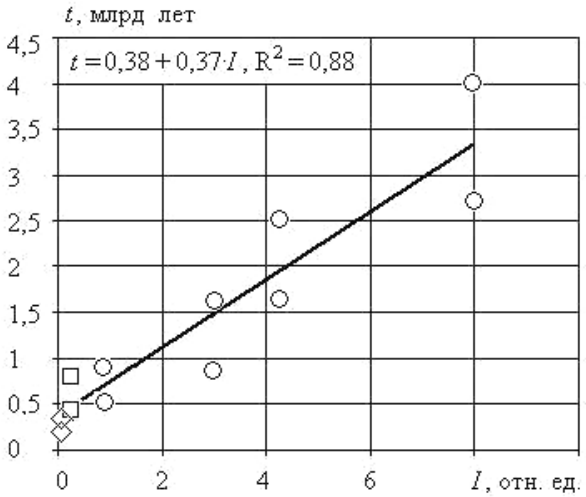

Рис. 4. Связь между интенсивностью излучения (*I,* отн. ед.) ИКЛ полосы кислородсодержащего центра O* ортоклаза (кружки) по данным О.М. Жиличевой (Жиличева, 2010) и лабрадора (квадраты и ромбы) по данным автора и возрастом горных пород, из которых собраны образцы. Здесь *t* – возраст, млрд лет.
Место сбора образцов: Балтийский щит (кружки), Украинский щит (квадраты), Урал (ромбы)

прямая зависимость $t = 0{,}38 + 0{,}37\ I$ (*t* – млрд лет, *I* – отн. ед.). Данные автора, полученные по двум разновозрастным объектам, не противоречат опубликованным (Жиличева, 2010), а дополняют их.

Более сложная зависимость отношений интенсивностей полос примесных атомов (см. табл. 1, рис. 5). Соотношение полос в спектре ИКЛ индивидуальны для минералов различного происхождения (Корепанов и др., 2006). Интенсивность полос люминесценции примесных ионов в первую очередь определяется содержанием Mn^{2+}. Кроме того, известно (Таращан, 1978; Горобец, Рогожин, 2001), что ион Mn^{2+} отличается повышенной восприимчивостью к передаче ему энергии возбуждения от решетки минерала и других центров люминесценции. То есть интенсивность его зависит от внутрикристаллического поля.

Автор благодарен Н.В. Вахрушевой, А.Ф. Коптяеву, предоставивших для исследования образцы плагиоклазов из своих личных коллекций; Г.А. Куприяновой за выполненный химический анализ лабрадоров; В.И. Соломонову – за исследование ИКЛ.

Заключение

Все исследованные лабрадоры по электрическим и люминесцентным параметрам разделяются на три группы.

Украинские лабрадоры и часть уральских («нормальных») по электрическим параметрам формируют в координатах $\lg R_o$, E_o прямую $\lg R_o = a - b\ E_o$. Корреляционное уравнение имеет вид $\lg R_o = 6{,}54 - 5{,}75 E_o$, $R^2 = 0{,}99$. На прямой украинские и уральские образцы не «смешиваются», а занимают самостоятельные позиции. В спектрах всех украинских образцов лабрадоров и некоторых уральских («нормальных»), кроме двух полос на длинах волн λ = (569–576) нм и λ = (750–764) нм, присущих всем образцам лабрадоров, присутствует слабо выраженная полоса на λ = (466–477) нм.

«Аномальные» лабрадоры по электрическим параметрам формируют отдельный ряд. В спектрах ИКЛ этих лабрадоров выделено только две полосы на длинах волн λ = (569–576) нм и λ = (750–764) нм.

Интенсивность ИКЛ собственных де-

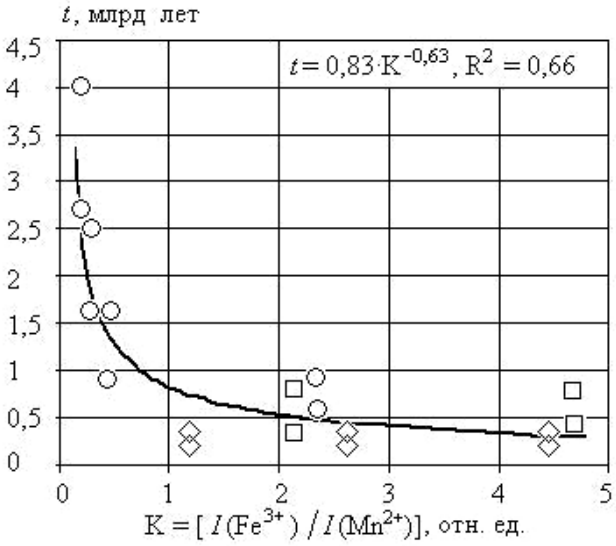

Рис. 5. Относительная интенсивность излучения полос $K = [I(Fe^{3+})/I(Mn^{2+})]$ ИКЛ ортоклаза (кружки) по материалам О.М. Жиличевой (Жиличева, 2010) и лабрадора (квадраты и ромбы – данные автора) в зависимости от возраста горных пород, из которых собраны образцы; *t* – то же, что на рис. 4

фектов плагиоклазов коррелирует с возрастом пород, из которых собраны образцы (от архея до палеозоя). С учетом материалов О.М. Жиличевой (Жиличева, 2010) и исследований автора получено уравнение связи $t = 0{,}38 + 0{,}37\ I$ (t – млрд лет, I – отн. ед.).

Так как мы не имели данных о месте сбора образцов, структуре исследованных плагиоклазов, их минеральной чистоте, то приведенные результаты позволяют говорить лишь о принципиальной возможности получения новой дополнительной информации о плагиоклазах, как петрогенетических индикаторах, электрическими и люминесцентными методами.

Литература

Бахтерев В.В. Высокотемпературные исследования гипербазитов Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 2008а. 151 с.

Бахтерев В.В. Высокотемпературная электропроводность некоторых полевых шпатов // Докл. РАН. 2008б. Т. 420. № 2. С. 199–202.

Бахтерев В.В. Электропроводность природных плагиоклазов в интервале температур 20–800 ºС // Уральский геофизический вестник. 2009. № 2. С. 4–10.

Бахтерев В.В., Соломонов В.И., Михайлов С.Г., Липчак А.И. Анализ минералов, горных пород и руд путем исследования их импульсной катодолюминесценции. Ин-т геофизики УрО РАН. Екатеринбург, 1998. 14 с. Ил. 9. Библиогр. 23 назв. – Рукопись деп. в ВИНИТИ 08.01.98. № 19-В98.

Борозновская Н.Н., Быдтаева Н.Г. Роль собственной люминесценции при оценке качества кварцевого сырья // Геммология. Томск: Изд-во ТГУ, 2004. С. 58–65.

Горобец Б.С., Рогожин А.А. Спектры люминесценции минералов. Справочник. М.: ВИЭМС, 2001. 312 с.

Грэй П. и Тейлор В.Х. Структуры плагиоклазов. Изменения анортитовой структуры // Полевые шпаты: 2-й сб. статей; Пер. с англ. А.С. Марфунина. М.: Изд-во иностр. лит., 1956. С. 47–56. [P. Gay, W.H. Taylor. The structures of the plagioclase feldspars, IV. Variations in the anorthite structure. Acta Cryst., 6, 647–650 (1953)].

Дир У.А., Хауи Р.А., Зусман Дж. Породообразующие минералы. В 5 т. М.: Мир. Т. 4. Каркасные силикаты, 1966. 482 с.

Жиличева О.М. Люминесцентные свойства минералов по данным импульсной катодолюминесценции: Автореф. дис. … канд. геолого-минералогических наук. ИГЭМ РАН. М., 2010. Адрес в Интернете http://www.igem.ru/aspirantura/autorefs/zhilicheva.pdf.

Иоффе В.А., Янчевская И.С. Диэлектрические потери в полевых шпатах // Журнал технической физики. 1958. Т. 38. № 10. С. 2154–2164.

Корепанов В.И., Лисицын В.М., Олешко В.И., Полисадова Е.Ф., Вильчинская С.С. Импульсная катодолюминесценция полевых шпатов // Журнал прикладной спектроскопии. 2006. Т. 73. № 3. С. 339–343.

Коул В.Ф., Серум Х. и Тэйлор В.Х. Структура плагиоклазов // Полевые шпаты: 2-й сб. статей; Пер. с англ. А.С. Марфунина. М.: Изд-во иностр. лит., 1956. С. 9–27. [W.F. Cole, H. Sorum, W.H. Taylor. The structures of the hlagioclase feldspars. Acta Cryst., 4, 20–29 (1951)].

Кумеев С.С. Полевые шпаты – петрогенетические индикаторы. М.: Недра, 1982. 208 с.

Лютоев В.П., Виноградова Н.П., Глухов Ю.В., Котова Е.Н. Дефекты кристаллической структуры породообразующих минералов как генетические метки метаморфических пород в разрезе Кольской сверхглубокой скважины // Вестник МГТУ. 2007. Т. 10. № 1. С. 18–36.

Марфунин А.С. Полевые шпаты – фазовые взаимоотношения, оптические свойства, геологическое распределение. М., 1962. 275 с. (Труды ИГЕМ АН СССР. Вып. 78).

Морошкин В.В., Гетманская Т.И., Расулов В.А., Кривощеков Н.Н. Люминесцентные свойства полевых шпатов из метаморфических и магматических горных пород и связанных с ними месторождений // ЗВМО. 2001. № 3. С. 87–94.

Морошкин В.В., Жиличева О.М., Расулов В.А. Люминесцентная спектроскопия полевых шпатов из пород Балтийского щита в связи с его геолого-геохимической

эволюцией // Геохимия. 2005. № 10. С. 1090–1097.

Пархоменко Э.И. Геоэлектрические свойства минералов и горных пород при высоких давлениях и температурах. М.: Наука, 1989. 198 с.

Садовский М.А. Насущные задачи геофизики в комплексе наук о Земле // Вестник Академии наук СССР. 1968. № 1. С. 59–63.

Соломонов В.И., Михайлов С.Г. Импульсная катодолюминесценция и ее применение для анализа конденсированных веществ. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 182 с.

Таращан А.Н. Люминесценция минералов. Киев: Наукова думка, 1978. 296 с.