



## ГЕОЭКОЛОГИЯ

Геоэкология / Geoeology

Оригинальная статья / Original article

УДК 550.372:552.525

DOI: 10.18470/1992-1098-2015-4-111-118

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ГЛИНИСТОГО МИНЕРАЛА КАОЛИНИТА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

**Абдулла А. Гусейнов**

*лаборатория геоэнергетических ресурсов, Институт проблем геотермии  
Дагестанского научного центра Российской академии наук,  
Махачкала, Россия, guseinov\_abdulla@mail.ru*

**Резюме. Цель.** Исследования температурной зависимости электропроводности глинистого минерала каолинита от кристаллохимических факторов и термических превращений. **Материалы и методика.** Применен метод исследования геоэлектрических свойств высокоомных материалов. **Результаты.** Приведены результаты исследования температурной зависимости электропроводности в интервале 100-1000°C глинистого минерала каолинита, имеющего большое научное и практическое значение. Установлено наличие общих закономерностей в характере изменения электропроводности в температурном поле для всех исследованных образцов, обусловленное существованием в кристаллической решётке минерала ассоциированных комплексов элементарных дефектов кристаллической решётки, играющих существенную роль в процессах кинетического характера в геосферах Земли. Наличие спектра значений энергии активации в области примесной проводимости характеризует ступенчатый характер дегидроксиляции и делокализации протонов гидроксильных групп из неэквивалентных энергетических позиций в кристаллической решётке минерала, что характеризует формирование флюидного режима осадочных толщ при дегидратации. **Выводы.** Установлено, что характер изменения электропроводности взаимосвязан с процессами, обусловленными существованием ассоциированных в комплексы элементарных дефектов в кристаллической решетке минерала. Спектр значений энергии активаций проводимости отражает процесс дегидроксиляции и делокализации протонов гидроксильных групп.

**Ключевые слова:** каолинит, ассоциированный комплекс, катион, дегидроксиляция, энергия активации.

**Формат цитирования:** Гусейнов А.А. Исследование электропроводности глинистого минерала каолинита в зависимости от температуры // Юг России: экология, развитие. 2015. Т.10, N4. С.111-118. DOI: 10.18470/1992-1098-2015-4-111-118

### ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF THE KAOLIN CLAY MINERAL DEPENDING ON THE TEMPERATURE

**Abdulla A. Guseinov**

*Laboratory of geo-energy resources, Institute of Geothermal Problems,  
Dagestan Scientific Center, Russian Academy of Sciences,  
Makhachkala, Russia, guseinov\_abdulla@mail.ru*

**Abstract.** The aim is to study temperature dependence of the electrical conductivity of the kaolin mineral on crystal-chemical factors and thermal transformations. **Methods.** We have applied the method of investigation of geo-electric properties of high-resistivity materials. **Results.** We gained the results of the study of the temperature dependence of electrical conductivity in the range of 100-1000 °C of the kaolin clay mineral, which is of great scientific and practical importance. We have proved the existence of the general laws of the nature of the change in the electrical con-



ductivity within the temperature range for all the samples studied, due to the existence of associated complexes of elementary defects in the crystal lattice of the mineral, which play an essential role in the kinetic nature in the geosphere of the Earth. Availability of the spectrum values of the activation energy in the extrinsic region characterizes the stepped nature of dehydroxylation and delocalization of protons of hydroxyl groups of non-equivalent positions of power in the crystal lattice of the mineral, which characterizes the formation of fluid regime of sedimentary strata in dehydration. **Conclusions.** It was found that the behavior of the electrical conductivity is interconnected with the processes caused by the existence of elementary defects associated in complexes in the crystal lattice of the mineral. The range of values of the activation energy of conductivity reflects the process of dehydroxylation and delocalization of protons and hydroxyl groups.

**Keywords:** kaolinite, associated complex, cation, dehydroxylation, activation energy.

**For citation:** Guseinov A.A. Electrical conductivity of the kaolin clay mineral depending on the temperature. *South of Russia: ecology, development*. 2015, vol. 10, no. 4, pp. 111-118. (In Russian) DOI: 10.18470/1992-1098-2015-4-111-118

## ВВЕДЕНИЕ

Решение фундаментальных проблем и задач прикладного характера в науках о Земле, развитие методов разведки, добычи, переработки и дальнейшего использования полезных ископаемых требует всестороннего изучения физических свойств геоматериалов. Исследование электрических свойств минералов и горных пород – одна из важнейших задач в науках о Земле, высокая чувствительность электропроводности к температуре, вещественному составу, к физико-химическим и фазовым превращениям обуславливают широкое применение результатов этих исследований в геофизике,

геологии, геотермии, сейсмологии, геохимии, горном деле. Следует отметить, что все перечисленные аспекты науки и практики необходимо смыкаются на широком круге экологических проблем, при решении которых большое значение имеет знание свойств минерального вещества Земли.

Поэтому изучение электропроводности компонентов земных недр имеет большое значение в познании фундаментальных проблем строения и геологической жизни Земли, с которой неразрывно связано развитие живых организмов на планете.

## МЕТОД И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе представлены результаты исследования температурной зависимости удельной электропроводности глинистого минерала каолинита в интервале 100-1000°C. Глинистые минералы составляют главную часть осадочных глинистых пород, кор выветривания, почв и составляют дисперсную часть ряда обломочных, карбонатных и других горных пород, а также некоторых гидротермальных образований.

Наиболее распространённым в природе каолиновым минералом является собственно каолинит. Он, как и другие глинистые минералы, находят широкое научное и практическое применение. Каолинит образуется, в основном, как при процессах выветривания различных горных пород, содержащих алюмосиликаты (полевошпат, слюды и др.), так и вследствие диагенных процессов – химического и физического преобразования продуктов седиментации. В этом случае при дегидратации минералов выделяется вода. При метаморфизме каоли-

нит превращается в другие минералы, выделяющаяся при этом вода играет важную роль в гидротермальных процессах [1].

Как известно, минералы каолиновой группы относятся к слоистым силикатам, их основной структурной единицей является каолиновый пакет  $Al_2(Si_2O_5) \cdot (OH)_4$ , состоящий из прочно связанных через атомы кислорода дитригональной сетки Si – O тетраэдров и Al – OH октаэдров, то есть являются двухслойными минералами. Химический состав каолинита:  $SiO_2$  – 46.5%,  $Al_2O_3$  – 39.5%,  $H_2O$  – 14.0%, примеси – Fe, Mg, Ca, Na, K, Ba. Химическая формула каолинита –  $Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$ .

Информация об электрической проводимости каолинитов весьма ограничена. Нам известны только две работы по этому вопросу, в которых были исследованы единичные образцы. Авторы [2] при изучении электропроводности в каолините в интервале 20-900 °C установили три последовательных этапа делокализации протонов, обусловленных по-

движностью протонов определённого сорта гидроксидов. В работе [3] установлена двухстадийная проводимость: при температурах ниже 275 и в интервале 275-450 °С, обуслов-

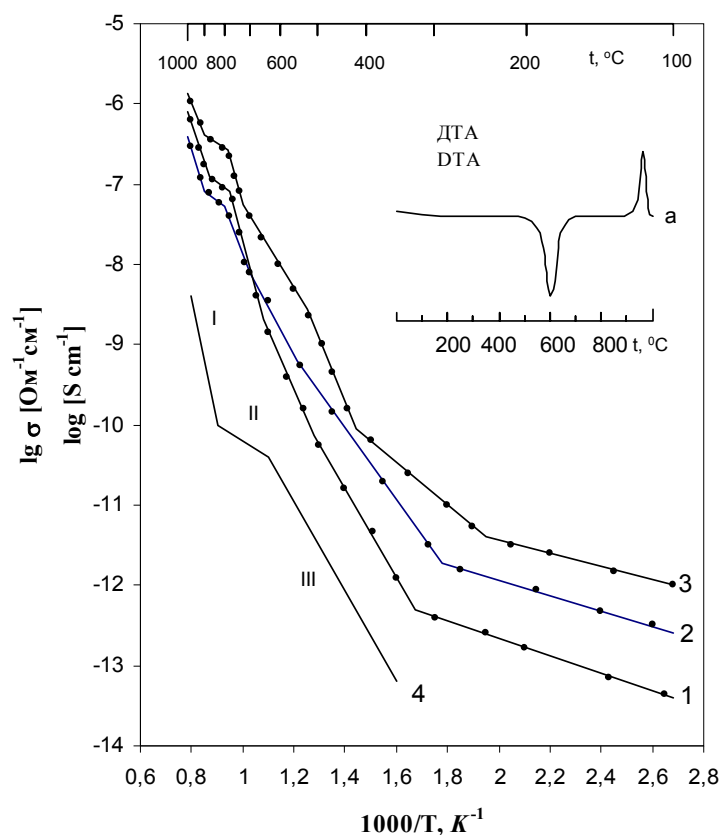
ленная неэквивалентностью гидроксильных групп в структуре каолинита. Полная картина электропроводности каолинитов в широком интервале температур не изучена.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Нами исследовано три образца каолинита из месторождения Pugu Hills, США (каолиниты 1, 2 и 3) и один образец из месторождения Глуховское (каолинит 4). Элементный состав минералов этой группы очень стабилен вследствие слабо развитых изоморфных замещений в структуре каолинита [1]. Это связано с основным структурным признаком каолинитов – полным отсутствием каких-либо замещений среди катионов в тетраэдрических и октаэдрических позициях, вследствие чего слой имеет практически нулевой заряд [4].

Электропроводность исследованных каолинитов измерялась на постоянном токе по методике, аналогичной примененной нами

в [5]. Каолинит встречается в природе в мелких чешуйках, поэтому образцы для измерения проводимости готовились прессованием в виде таблеток диаметром 10 мм и толщиной около 1 мм. На рисунке 1 представлены результаты исследования зависимости удельной электропроводности  $\sigma$  образцов каолинита от абсолютной температуры  $T$  в системе координатах  $\lg \sigma = f(1/T)$ , представляющие собой семейство прямых, проявляющих изломы при определенных температурах (во избежание загромождения рисунка на графике представлены только образцы каолинитов 1, 2 и 4).



**Рис. 1. Зависимость электропроводности каолинитов от температуры:**

1 – каолинит 2; 2 – каолинит 1; 3 – каолинит 4;  
4 – общая схема; а – термограмма ДТА каолинита 3.

**Fig. 1. The dependence of the electrical conductivity of kaolin minerals on the temperature:**  
1 - kaolin 2; 2 - kaolin 1; 3 - kaolin 4; 4 - general scheme; a - DTA thermogram of kaolin 3.



Прямолинейный характер зависимости  $\lg \sigma = f(1/T)$  на каждом из температурных участков свидетельствует об ионном механизме проводимости, подчиняющемся экспоненциальной зависимости вида

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-E_0/kT), \quad (1)$$

где  $\sigma_0$  – предэкспоненциальный множитель,  $E_0$  – энергия активации электропроводности,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура. Определённые из экспериментальных результатов значения  $E_0$  и  $\lg \sigma_0$  всех каолинитов на соответствующих температурных интервалах представлены в таблице 1.

Таблица 1

Значения  $\lg \sigma$ ,  $\lg \sigma_0$  и  $E_0$  каолинитов

Table 1

Values  $\lg \sigma$ ,  $\lg \sigma_0$   $E_0$  of kaolin minerals

N	Образец Sample	$\lg \sigma$ при $t$ °C [ $\text{Ohm}^{-1} \text{cm}^{-1}$ ] $\log \sigma$ at $t$ , °C [ $\text{Ohm}^{-1} \text{cm}^{-1}$ ]			$t$ °C	$E_0$ , эВ $E_0$ , eV	$\lg \sigma_0$ $\log \sigma_0$
		200	600	1000			
		2	3	4			
1	каолинит 1 kaolinite 1	-12.08	-8.71	-6.30	до 289	0.22	-9.58
					289-546	0.88	-3.92
					546-698	1.25	-1.68
					698-780	1.92	1.76
					780-903	0.73	-3.82
					903-1000	1.64	0.08
2	каолинит 2 kaolinite 2	-12.00	-8.16	-6.12	до 322	0.18	-10.82
					322-514	0.90	-3.99
					514-652	1.64	0.22
					652-768	2.30	3.75
					768-903	0.47	-4.80
					903-1000	2.03	1.75
3	каолинит 3 kaolinite 3	-12.36	-8.15	-6.60	до 242	0.20	-10.15
					242-364	0.61	-6.27
					364-500	1.10	-2.41
					500-612	1.36	0.64
					612-670	0.42	-5.95
					670-1000	1.32	-1.17
4	каолинит 4 kaolinite 4	-11.34	-8.11	-6.08	до 240	0.17	-9.77
					240-446	0.49	-6.64
					446-533	1.85	2.87
					533-769	0.98	-2.54
					769-850	1.78	1.35
					850-925	0.46	-4.86
					925-1000	2.51	4.49

Анализ экспериментальных результатов показывает наличие общих закономерностей изменения зависимости электропроводности от температуры для всех исследованных образцов каолинитов: это наличие трех

основных областей на зависимостях  $\lg \sigma = f(1/T)$ , которые характеризуются своими значениями предэкспоненциального множителя  $\sigma_0$  и энергии активации  $E_0$  (области I, II и III на общей схеме рис.1). Такая картина зависи-



мости электропроводности от температуры является типичной для реальных кристаллов с ионным характером межатомных связей [6]. Аналогичный характер температурной зависимости электропроводности с наличием областей I, II и III был установлен и детально проанализирован нами ранее во флогопитах [7].

Низкотемпературные прямолинейные участки на графике (рис. 1) связаны с примесным механизмом проводимости. При этих температурах концентрация вакансий в кристаллической решетке минералов, необходимых для реализации ионного механизма проводимости, обусловлена главным образом присутствием в кристаллах иновалентной примеси и общей дефектностью кристаллической решетки минерала; число вакансий, возникающих при этих температурах вследствие тепловой активации, крайне мало.

Для всех исследованных образцов каолинита в области III имеются по несколько изломов на графиках проводимости, т.е. наблюдается спектр значений энергии активации  $E_0$ . Рассмотрим этот вопрос подробнее на примере образца каолинит-4. На графике электропроводности образца каолинит-4 до температуры 240°C следует участок с энергией активации  $E_0 = 0.17$  эВ. Далее наблюдается более крутой отрезок линии проводимости, в интервале 240–446°C, с увеличением  $E_0$  до 0.49 эВ. При дальнейшем повышении температуры, вплоть до 533°C, имеется еще более крутой участок с  $E_0 = 1.85$  эВ и далее до 769°C отрезок с  $E_0 = 0.98$  эВ. Замыкает рассматриваемую область III участок между 769–850°C с  $E_0 = 1.78$  эВ. Температурные интервалы и значения энергии активации  $E_0$  на них для остальных образцов приведены в таблице 1.

Для интерпретации полученных для области III результатов воспользуемся материалами по термическому анализу слоистых силикатов. Согласно термическому исследованию каолинитов методом рентгенографического анализа [8], наблюдается три этапа последовательной дегидроксиляции протонов из гидроксильных групп в структуре каолинита, причем каждая из последовательных температур 200°C, 300°C и 400°C приходится на соответствующий этап дегидроксиляции. Как видно из рис. 1, температуры 200, 300 и 400°C достаточно согласованно приходятся на первые три прямолинейных участка на кри-

вой проводимости рассматриваемого каолинита-4.

Это свидетельствует о том, что на графике зависимости электропроводности от температуры четко фиксируются все эти три этапа дегидроксиляции в каолините при нагревании, когда проявляется динамический характер водородного иона при его отрыве от ОН-группы и переходе от одного кислородного атома к другому, то есть имеет место движение делокализованного протона по вакантным позициям. Наличие нескольких этапов дегидроксиляции со спектром значений энергии активации этого процесса означает, что каждый этап характеризуется подвижностью протонов определенного сорта гидроксильных из неэквивалентных кристаллографических позиций в структуре минерала [4].

Снова обратимся к нашим результатам. Энергия активации ионного переноса на самом первом участке графика для каолинита-4, до температуры 240°C, составляет величину 0.17 эВ, а также 0.22 эВ, 0.18 эВ и 0.20 эВ соответственно для каолинитов 1, 2 и 3 (рис. 1). Эти величины хорошо согласуются с энергией связи гидроксильных, участвующих в водородной связи между слоями каолинита  $E_{св} = 0.19$  эВ [4]. Ясно, что на этом этапе дегидроксиляция затрагивает наименее связанные гидроксильные группы. Здесь переход протона осуществляется путем тунелирования потенциального барьера О–Н-связи (энергия диссоциации этой связи около 4.79 эВ) при энергии активации около 0.18 эВ, что очень хорошо согласуется с определенными нами значениями энергии активации электропроводности на первом низкотемпературном участке проводимости.

При дальнейшем повышении температуры до 446°C наблюдается второй прямолинейный участок с энергией активации  $E_0 = 0.49$  эВ для выбранного для анализа каолинита-4. Аналогичные участки имеются у каолинита-1 (0.88 эВ), у каолинита-2 (0.90 эВ) и у каолинита-3 (0.61 эВ). Анализ результатов наших исследований, а также литературного материала по структурным и термическим исследованиям каолинитов [3, 4, 8, 9] позволяет сделать вывод, что рассматриваемая область проводимости после излома при 240°C отражает энергетические изменения в последовательном разрушении ОН-групп в других кристаллографических позициях. Таковыми являются гидроксильные, связанные с тетраэдр-



рической сеткой в каолините.

Из анализа рассмотренного выше материала следует, что на первом этапе проводимости при низких температурах доминирует протонная проводимость. На втором этапе, при более высокой температуре, в процесс проводимости вовлекается все большее количество ионов из структуры минерала, а дегидроксидация влияет на процесс проводимости большей частью посредством изменения энергетического состояния кристалла. Проводимость в этом случае будет представлять собой процесс наложения на ионную проводимость протонной с интегральным значением энергии активации  $E_0 = 0.49$  эВ.

Участок на графике электропроводности после излома при  $446^\circ\text{C}$  (для каолинита-4) отражает дегидроксидацию из октаэдрических слоев каолинита. Повышение энергии активации на этом этапе необходимо связать с тем фактом, что гидроксильная группа в октаэдрическом слое обладает сильной связью, входя в структуру минерала как комплексный ион.

Следующий этап проводимости в области III после излома при  $553^\circ\text{C}$  (на примере каолинита-4) взаимосвязан с окончательным выделением всех гидроксидов из минерала в виде молекул воды; этот процесс был установлен при термическом исследовании каолинитов [8]. Эндотермический эффект на кривых дифференциального термического анализа (ДТА) в этой температурной области обусловлен взаимодействием соседних ОН-групп, при котором образуются и удаляются из структуры минерала молекулы воды, при этом образуется обезвоженная фаза – метаксаолинит.

Проанализированные выше на примере каолинита-4 температурные интервалы в области III характерны также и для каолинитов 1, 2 и 3, однако граничные температуры этих интервалов и значения энергий активации на них варьируют, имеют свои характерные значения, отражающие кристаллохимические особенности минералов и структурную и энергетическую неэквивалентность гидроксильных групп в каолините, что является свидетельством значительной информативности метода геоэлектрических исследований.

Резюмируя изложенное можно заключить, что в температурной области III наблюдаемый спектр значений энергии активации ионной проводимости в каолинитах отражает

последовательные этапы дегидроксидации и, в конечном итоге, дегидратации в структуре минерала. При этом образуются молекулы воды, которые затем перемещаются в межслоевые промежутки, на поверхность зерен минерала, а затем покидают кристалл. Методом ДТА фиксируется только один этап дегидратации гидроксидов (термограмма каолинита-3 приведена на рис. 1). А результаты нашего исследования показывают, что по данным электропроводности дегидроксидация протекает постадийно, при нескольких температурах. Рассматриваемые температуры соответствуют известным тепловым режимам областей осадочных бассейнов земной коры, где происходит эндогенное преобразование минерального вещества. В результате рассмотренных процессов происходит выделение воды из глинистых минералов, которая участвует в формировании флюидных потоков в геотермальных осадочных бассейнах.

При дальнейшем повышении температуры на графиках проводимости во всех образцах после области III следует область II с характерным значением энергии активации, которая для каолинита-4 составляет  $0.46$  эВ. Согласно современным представлениям ионной проводимости кристаллов при температурах, соответствующих области III, дефекты кристаллической решетки ассоциированы в комплексы вида «катионная вакансия + примесный ион» [6]. Чтобы вакансия могла двигаться по кристаллу и обеспечивать диффузионный процесс, необходимо затратить энергию на диссоциацию этого комплекса. Поэтому полная энергия активации ионной проводимости  $E$  в области III равна:

$$E_0 = E_{\text{дис}} + E_{\text{дв}}, \quad (2)$$

где  $E_{\text{дис}}$  – энергия диссоциации комплекса и  $E_{\text{дв}}$  – энергия движения вакансии.

При достижении температурной области II все указанные комплексы полностью диссоциированы, поэтому энергия активации состоит только из одной энергии движения вакансии:

$$E_0 = E_{\text{дв}}. \quad (3)$$

В сумме области III и II представляют собой область примесной проводимости. Здесь движение атомов по кристаллической решетке осуществляется за счет вакансий, обусловленных в основном примесными эффектами.

При более высоких температурах на зависимостях  $\lg \sigma = f(1/T)$  после области II





следует наиболее крутой участок I, на котором действует механизм собственной проводимости, при котором температурный режим, воздействующий на кристалл, обеспечивает возникновение новых вакантных позиций в кристаллической решетке. Эти новые, возникающие термическим путем вакансии своим количеством значительно превосходят вакансии из области примесной проводимости. Энергия активации ионного переноса в этом случае складывается из энергии образования и энергии движения вакансии:

$$E_0 = E_{\text{дв}} + E_{\text{обр}} / 2, \quad (4)$$

где  $E_{\text{дв}}$  – энергия движения вакансии,  $E_{\text{обр}}$  – энергия образования полного дефекта Шоттки.

На основании этих результатов можно, исследовав температурную зависимость электропроводности минерала, определить энергии  $E_{\text{дис}}$ ,  $E_{\text{дв}}$  и  $E_{\text{обр}}$ .

Кинетические параметры  $E_{\text{дис}}$  и  $E_{\text{дв}}$  из равенства (2) характеризуют диффузионное движение атомов в минералах, являющееся, как известно, основой реологических процессов в недрах Земли, твердофазных преобразований силикатов при гипергенезе, при эндогенных преобразованиях и при последующем метаморфическом преобразовании продуктов выветривания горных пород в недрах Земли.

Процессы диагенеза, происходящие в осадочных отложениях, сопровождаются значительным массопереносом, в частности поэтапной дегидроксидацией и выделением воды при дегидратации минералов глин, и эти процессы скоррелированы с механизмом из-

менения ионной проводимости, как было показано выше. При повышении степени метаморфизма значительно сжатые и нагретые флюиды и газы находят пути к поверхности. Поскольку в метаморфизованных породах фактически отсутствует макроскопическая пористость, флюиды должны двигаться посредством диффузии по дефектным позициям в горных породах [10].

Поэтому полученные нами кинетические параметры движения ионов по дефектным позициям в минералах имеют большое научное и практическое значение, в частности для изучения взаимодействия флюид – порода и практического освоения источников геотермальной энергии, а также для оценки возможности миграции радиоактивных элементов в местах их захоронения.

Полученная картина взаимосвязи поведения гидроксидов с характером изменения электропроводности каолинитов при тепловой активации представляет также интерес в следующем. Согласно [11], в каолините происходит накопление трития по модели обмена, согласно которой тритий сначала мигрирует из раствора в пограничные слои, а затем заменяет протоны в структурных гидроксидлах. Так как тритий замещает протоны, то полученные нами результаты по электропроводности каолинитов, отражающие картину поведения гидроксидов при термической активации, будут давать информацию по кинетическим параметрам миграции этого радиоактивного изотопа.

## ВЫВОДЫ

1. На основании проведенного исследования впервые дано объяснение наиболее общим закономерностям зависимости электропроводности каолинитов от температуры на основании механизма, обусловленного существованием ассоциированных комплексов элементарных дефектов кристаллической решетки минерала, которые играют значительную роль в процессах кинетического характера в геоматериалах.

2. В широком интервале температур для каолинитов определены значения энергии активации электропроводности и предэкспоненциальные множители. Показана принципиальная возможность определения по ре-

зультатам исследования энергии образования и энергии движения вакансий в решетке минерала; эти параметры определяют интенсивность диффузионных процессов в условиях геосфер Земли.

3. Установлена взаимосвязь между спектром значений энергии активации электропроводности и процессом дегидроксидации и делокализации протонов гидроксильных групп в каолинитах при тепловой активации. Это дает принципиальную возможность оценивать по данным электропроводности энергетические характеристики и температуры протекания термических процессов в этих минералах.



### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Минералы. Под редакцией Чухрова Ф.В. 1992. Том 4. Выпуск 1. Москва: Наука. 599 с.
2. Toussaint F., Fripiat J., Gastuche M. Dehydroxylation of kaolinite. Pt. 1. Kinetics // Journal of Physical Chemistry. 1963. V. 67. N1. P. 26-30.
3. Maiti G.C., Freund F. Dehydration-related proton conductivity in kaolinite // Clay Minerals. 1981. V.16. N4. P. 395-413.
4. Куковский Е.Г. Превращения слоистых силикатов. Киев: Наукова думка. 1973. 104 с.
5. Guseinov A.A. Electrical Properties of Some Magmatic Dike Rocks at High Temperatures // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2012. Vol. 48, N9-10, pp. 751-758.
6. Чеботин В.Н. Физическая химия твёрдого тела. М.: Химия. 1982. 320 с.
7. Guseinov A.A., Gargatsev I.O., Gabitova R.U. Electrical Conductivity of Phlogopites at High Temperatures. Izvestiya, Physics of the Solid Earth, Vol. 41, N8, 2005, pp. 670-679.
8. De A.K., Bhattacharjee S. An X-ray analysis of stacking disorder in kaolinite by fourth moment. Clay Minerals. 1985. v. 20. N2. P. 249-253.
9. Maiti G.C., Freund F. Dehydration-related proton conductivity in kaolinite. Clay Minerals. 1981. V.16. N4. P. 395-413.
10. Мюллер Р., Саксена С. Химическая петрология. М: Мир. 1980. 520 с
11. Kalinichenko E.A., Pushkarova R.A., Hach-Ali F.P., López-Galindo A. Tritium accumulation in structures of clay minerals. Clay Minerals. 2002. V. 37. N3. P. 497-508.

### REFERENCES

1. Chuhrov F.M. ed. *Mineraly*. [Minerals]. Moscow, Nauka Publ., 1992, Vol., 4. iss. 1, 599 p. (In Russian)
2. Toussaint F., Fripiat J., Gastuche M. Dehydroxylation of kaolinite. Pt. 1. Kinetics // Journal of Physical Chemistry. 1963. V. 67, no. 1. pp. 26-30.
3. Maiti G.C., Freund F. Dehydration-related proton conductivity in kaolinite // Clay Minerals. 1981. V.16. no. 4. pp. 395-413.
4. Kukovskii E.G. P. *Prevrasheniya sloistekh silikatov* [Transformation of Layer Silicates]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1973, 104 p. (In Russian)
5. Guseinov A.A. Electrical Properties of Some Magmatic Dike Rocks at High Temperatures. Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2012. Vol. 48, no. 9-10, pp. 751-758.
6. Chebotin V.N. *Fisicheskaja himija tvjrdogo tela* [Physical Chemistry of Solids]. Moscow, Himija Publ., 1982, 320 p. (In Russian)
7. Guseinov A.A., Gargatsev I.O., Gabitova R.U. Electrical Conductivity of Phlogopites at High Temperatures. Izvestiya, Physics of the Solid Earth, Vol. 41, no. 8, 2005, pp. 670-679.
8. De A.K., Bhattacharjee S. An X-ray analysis of stacking disorder in kaolinite by fourth moment. Clay Minerals. 1985. v. 20. no. 2. pp. 249-253.
9. Maiti G.C., Freund F. Dehydration-related proton conductivity in kaolinite. Clay Minerals. 1981. V.16. no. 4. pp. 395-413.
10. Mjuller R., Saksena S. *Himicheskaja petrologija* [Chemical Petrology]. Moscow, Mir Publ., 1980. 520 p. (In Russian)
11. Kalinichenko E.A., Pushkarova R.A., Hach-Ali F.P., López-Galindo A. Tritium accumulation in structures of clay minerals. Clay Minerals. 2002. V. 37. no. 3. pp. 497-508.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

#### Принадлежность к организации

**Абдулла А. Гусейнов** – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории геоэнергетических ресурсов института проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН, тел. 8-906-447-88-72, 367030, пр. И. Шамиля 39а, ИПГ ДНЦ РАН, Махачкала, Россия,  
e-mail: guseinov\_abdulla@mail.ru

#### Критерии авторства

Абдулла А. Гусейнов подготовил статью и несет ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

### AUTHOR INFORMATION

#### Affiliations

**Abdullah A. Guseinov** - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher at the Laboratory of geo-energy resources, Institute of Geothermal Problems, Dagestan Scientific Center, Russian Academy of Sciences. tel. 8-906-447-88-72, 39a I. Shamilya st., Makhachkala, 367030 Russia, e-mail: guseinov\_abdulla@mail.ru

#### Contribution

Abdulla A. Guseinov is the sole author of the article and responsible in case of detection of plagiarism.

#### Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Поступила 24.09.2015

Received 24.09.2015