

структуры. Поэтому для осуществления движения транспорта ионов, то есть для движения вакансий, необходимо затратить энергию как на диссоциацию такого комплекса, так и на движение вакансии, поэтому энергия активации  $E$  на участке III имеет большее значение (в среднем около 1.20 эВ), чем на участке II. Отмеченные комплексы играют большую роль при процессах метаморфизма в горных породах, поэтому знание кинетических параметров, энергии активации  $E$  и предэкспоненциального множителя  $\sigma_0$  имеет большое значение.

На участке III во всех образцах в области 300°C наблюдаются промежуточные изломы, отражающие происходящие изменения в известняках при термическом воздействии, природа которых пока еще не ясна.

Высокотемпературная область I представляет собой так называемую область собственной проводимости кристаллов, проводимость главным образом осуществляется за счет вакансий, возникающих в кристаллической решетке под действием температуры. Для этой области характерны самые высокие значения энергии активации, например в образце № 5  $E = 2.61$  эВ. Эта энергия складывается из энергии создания вакансии и энергии ее движения в кристалле. Таким образом, мы получаем важную информацию, характеризующую энергетическую картину преобразования минералов.

Изломы в области 700°C сопряжены с началом значительного уменьшения вакуума измерительной камере вследствие начала довольно интенсивного газовыделения. Видимо это связано с началом процесса декарбонатизации известняка и выделением  $\text{CO}_2$ .

Согласно данным термического анализа максимум пика ДТА приходится примерно на 950°C, которому соответствуют изломы на кривых проводимости.

Эти результаты показывают, что метод электропроводности фиксирует начало разложения карбонатов на более ранних стадиях, чем дифференциальный термический анализ.

Работа поддержана Программой Президиума РАН П-09 «Исследование вещества в экстремальных условиях» подпрограмма «Физика и механика сильносжатого вещества и проблемы внутреннего строения Земли и планет».

#### Литература

1. Карбонатные породы. Генезис, распространение, классификация. М.: Мир, 1970. Т.1. 396 с.
2. Соболев. Г.А. Основы прогноза землетрясений. М: Наука. 1993. 313 с.
3. Гесейнов А.А., Батырмурзаев А.С., Гаргацев И.О. Установка для исследования температурной зависимости электрических свойств твердых диэлектриков // Заводская лаб. 1983. №6. С.64-65.
4. Годовиков А.А. Минералогия. М: Недра. 1975. 520 с.
5. Вест А. Химия твердого тела. Теория и приложения. М.: Мир.1988. Ч.2. 336 с.

### Электропроводность и реологические характеристики дайковых пород Южного Дагестана

А. А. Гусейнов<sup>1</sup>, М.-П. Б. Айтеков<sup>2</sup>  
ИПГ ДНЦ РАН<sup>1</sup>, ИГ ДНЦ РАН<sup>2</sup>

Исследованные образцы магматических пород являются материалом из даек сложного строения (Южный Дагестан), представленные в центральной части гранит-порфирами, а в краевых частях – диабазами. Локализация таких магматических пород приурочена к зоне многочисленных рудопроявлений в зоне Главного Кавказского (Ахтычайского) разлома. Вмещающие породы представлены глинистыми сланцами. Такие дайки являются индикаторами возникновения системы трещин в земной коре и сравнительно быстрого их заполнения магматическим расплавом [1]. В этой связи исследование геоэлектрических свойств таких пород представляет значительный интерес.

Исследовано 5 образцов гранит-порфира и 5 образцов диабаза. Гранит-порфир: образцы 51-5, 51-6, 51-7, 57-11 и 51-12; минералогический состав породы (в процентах): полевой шпат – 60, кварц – 30, хлорит – 5, серицит – 3, мусковит – 2. Диабаз: образцы 51-3, 51-4, 51-8, 51-9, 51-10; минералогический состав (%): плагиоклаз – 60, кварц – 12, хлорит – 25, рудные минералы – 3. Химический состав образцов приведен в работе [2].

Методика подготовки образца для исследования электропроводности предполагала распиловку горной породы на плоскопараллельную пластину толщиной 1-2 мм, из которой вырезался диск диаметром 10 мм, с последующей шлифовкой поверхностей. Изготовленный образец помещался в измерительную ячейку, измерения в заданном интервале температур проводились по методу [3].

Результаты исследования удельной электропроводности  $\sigma$  гранит-порфиров и диабазов от абсолютной температуры  $T$  в виде зависимостей  $\lg \sigma = f(1/T)$  приведены на рис.1 (чтобы не загромождать график приведена только часть образцов). Полученные зависимости представляют собой семейство прямых, проявляющих изломы при характерных температурах. Прямолинейный характер зависимостей  $\lg \sigma = f(1/T)$  свидетельствует о выполнении экспоненциального закона температурной зависимости удельной проводимости пород:  $\sigma = \sigma_0 \exp(-E/kT)$ , где  $\sigma_0$  – предэкспоненциальный множитель,  $E$  – энергия активации электропроводности,  $k$  – постоянная Больцмана.

В среднем проводимость гранит-порфиров меняется от  $10^{12} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$  при 200°C до  $4 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$  при 1000°C, то есть изменение  $\sigma$  составляет 8 порядков. Общим для всех образцов в низкотемпературной

области, где доминирует примесный механизм проводимости, является наличие излома в интервале 300-400°C, а также наличие участка со средним значением энергии активации порядка 0,50 эВ при температурах около 600°C. Выше этого участка при более высоких температурах следует область собственной проводимости, где энергия активации для разных образцов лежит в интервале от 1,75 до 3,41 эВ.

Таким образом, мы имеем типичную картину ионной проводимости с областями I, II и III, основные проявления которой для силикатных минералов нами были установлены ранее [3, 4, 5]. Необходимо отметить, что внутри областей как примесной, так и собственной проводимости имеются ряд дополнительных изломов, отражающих проявление многокомпонентности изучаемых объектов.

Проанализируем отмеченный выше излом при 300-400°C, имеющий место во всех образцах. Природу этого излома логичней всего отнести к проявлениям свойств наиболее преобладающей минеральной компоненты гранит-порфиров – полевоому шпату, содержание которого составляет 60 %. Действительно, для электропроводности полевых шпатов характерно наличие подобного изменения электропроводности при температуре 375°C, которое обусловлено полиморфным переходом моноклинный – триклинный (МТ-переход) [5].

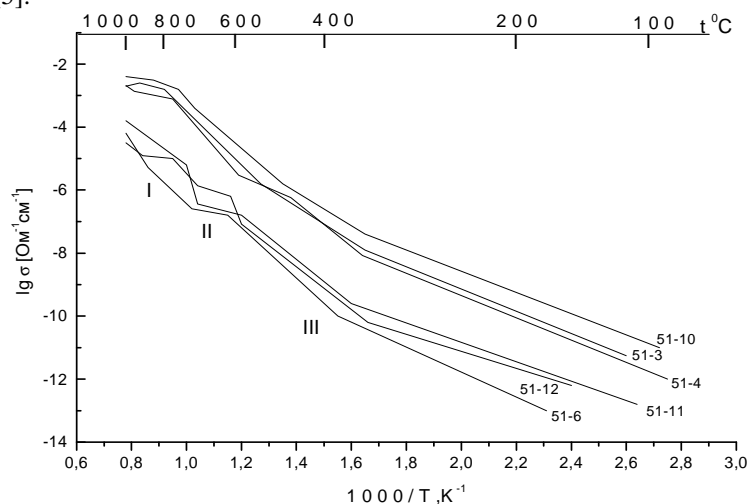


Рис. 1. Температурная зависимость удельной электропроводности магматических пород; гранит-порфиры: 51-6, 51-11, 51-12; диабазы: 51-3, 51-4, 51-10.

Результаты исследования электропроводности диабазов также показывают наличие излома при 300-400°C, как и в гранит-порфирах. Видимо, и в этом случае на характер изменения проводимости доминирующее влияние оказывает полевошпатовая компонента. Переход от примесной проводимости к собственной в диабазовых породах происходит в области 600-700°C. Отличительной особенностью зависимостей  $\lg \sigma = f(1/T)$  диабазов является не проявление, размытость области II. Объяснением этому может служить такая особенность диабазов, что составляющие эту породу минералы в большей или меньшей степени подверглись разложению. Величина энергии активации в области собственной проводимости имеет типичное для кристаллов с ионной проводимостью значение в среднем порядка 2,50 эВ.

Согласно полученным результатам электропроводность диабазов во всем интервале температур превышает проводимость гранит-порфиров. При 200°C различие в проводимости этих пород составляет величину несколько более одного порядка, в области 500-600°C максимальное сближение значений их проводимости, а затем с повышением температуры дифференциация снова возрастает, достигая при 800°C разницы в проводимости в полтора порядка. Увеличение проводимости в ряду диабаз – гранит-порфир подтверждает выводы о влиянии основности на величину электрических параметров изверженных пород, так как увеличение содержания кварца в изверженной породе приводит к уменьшению её электропроводности [6].

Характерной особенностью изменения электропроводности части исследованных образцов гранит-порфира (образцы 51-5, 51-12) и всех образцов диабазы является наличие в области 900°C участков с очень низкой, в среднем около 0,30 эВ, энергией активации. Причиной такого резкого снижения  $E$  проводимости скорее всего может быть начинающееся при этих температурах локальное плавление отдельных областей в объеме породы.

#### *Вычисление диффузионной вязкости гранит-порфира и диабазы*

Применение реологических характеристик вещества Земли охватывает широкий круг проблем: построение моделей эволюции Земли на различных этапах, взаимодействие течений вещества в мантии с корой, интерпретация геотермических данных во взаимосвязи с развитием интенсивного массотеплопереноса в земных недрах и т.д. [7,8].

При температурах  $T > 0.5$  температуры плавления и при нагрузках ниже предела упругости, когда скольжение дислокаций невозможно, ползучесть осуществляется путем объемной диффузии – ползучесть Набарро-Херринга, или путем диффузии по границам зерен при более низких температурах - пол-

зучесть Кобле [7, 37, 38]. Эти два типа ползучести являются составными частями единого процесса пластического течения, известного как "диффузионный крип". Диффузионная ползучесть твердых тел происходит за счет миграции точечных дефектов кристаллической решетки – вакансий, и осуществляется как связанное течение вещества.

В горных породах и минералах в природных и экспериментальных системах пластическое течение в твердом состоянии зависит главным образом от строения кристаллической решетки минералов, температуры, скорости деформации и в меньшей мере от давления; эффективный коэффициент вязкости поликристаллических тел определяется диффузионным механизмом и является свойством конкретного тела, слабо зависящим от примесей [34, 39]. Как показывают исследования, в условиях высоких температур, медленных деформаций при низких дифференциальных напряжениях в кварцсодержащих породах преобладает механизм крипа Набарро-Херринга [9,10].

Как известно, диффузионная вязкость  $\eta$  определяется выражением

$$\eta = AkTr^2/a^3D \quad (1)$$

где  $A$  – константа ( $1/30$ ),  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура,  $r$  – средний размер зерна кристаллического тела,  $a$  – постоянная решетки,  $D$  – коэффициент самодиффузии. Для определения  $D$  обычно прибегают к теоретическим расчетам [11, и др.]. Применение данных по электропроводности дает возможность использовать при расчетах вязкости экспериментально определяемые для конкретного образца породы параметры. Действительно, перепишем (1) в виде

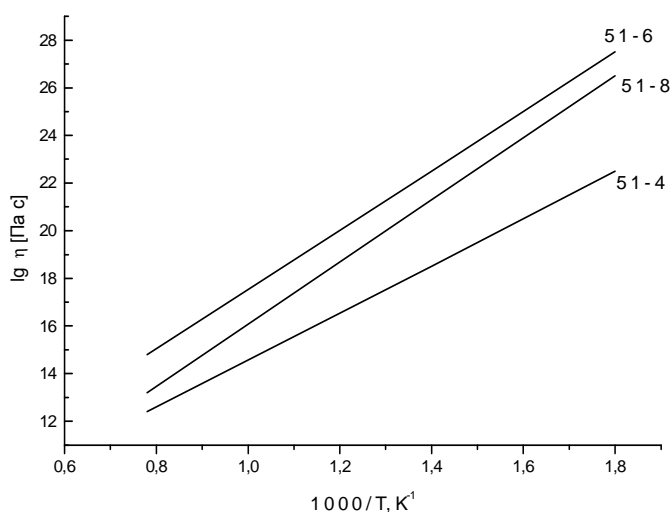
$$\eta = (AkTr^2/a^3D_0) \exp(E/kT), \quad (2)$$

где  $D_0$  – предэкспоненциальный множитель,  $E$  – энергия активации самодиффузии. Поскольку в этом выражении  $D_0$  можно считать константой, то величина  $\eta$  определяется в основном отношением  $E/kT$ .

Для определения максимальных значений  $\eta$  следует ориентироваться на максимальные значения энергии активации, включающие в себя энергию образования и энергию движения вакансии. Таким параметром является определяемая из температурной зависимости электропроводности энергия активации  $E$  в температурной области действия собственного механизма проводимости. Для определения  $D_0$  использованы вычисленные для разных температур значения коэффициентов диффузии  $D$  с использованием соотношения Нернста-Эйнштейна, связывающего коэффициент диффузии  $D$  с удельной проводимостью  $\sigma$ :

$$\sigma/D = Ne^2/kT,$$

где  $N$  – число атомов в единице объема,  $e$  – заряд иона,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура.



Как видно из уравнения (2), величина вязкости зависит от размера зерна  $r$ . Даже в случае крупнозернистого материала большие зерна состоят из субзерен. Так как границы субзерен могут действовать как источники и стоки точечных дефектов – вакансий [12], поэтому в уравнении (2) вместо размера зерен  $r$  можно использовать размер субзерен. Известно, что размер субзерен зависит от приложенного напряжения и не зависит от температуры [7]. Ранее нами было показано, что при касательных напряжениях ниже предела упругости в полевых шпатах размер субзерна есть величина  $r \approx 1$  мм [13]. При вычислении вязкости образцов гранит-порфира и диабаз по формуле (2) значения  $r \approx 1$  мм и межатомного расстояния  $a = 8.87 \cdot 10^{-10}$  м брались как для полевого шпата, учитывая его доминирующее содержание в этих породах.

Вычисленные по формуле (2) значения  $\eta$  (Па·с) при различных температурах представлены графически в системе координат  $\lg \eta = f(1/T)$  на рис. 2. Общим для всех исследованных образцов является подчинение зависимости  $\lg \eta$  от  $T$  экспоненциальному закону

$$\eta = \eta_0 \exp(E/kT), \quad (3)$$

где  $\eta_0$  – предэкспоненциальный множитель ( $\eta = \eta_0$  при  $T \rightarrow \infty$ ).

Анализ полученных результатов показывает, что при температурах около 800°C, соответствующих условиям астеносферного слоя, среднее полученное значение вязкости для исследованных образцов  $\eta$  порядка  $10^{16}$  Па с соответствует известным оценкам [7,8]. При рассмотрении вязкости при более низких температурах необходимо отметить, что величина  $\eta \geq 10^{26}$  Па с, характеризующая вязкость самого вещества литосферы и проявляющаяся при горизонтальном ее растекании [8], в наших результатах наблюдается при температурах ниже 300°C.

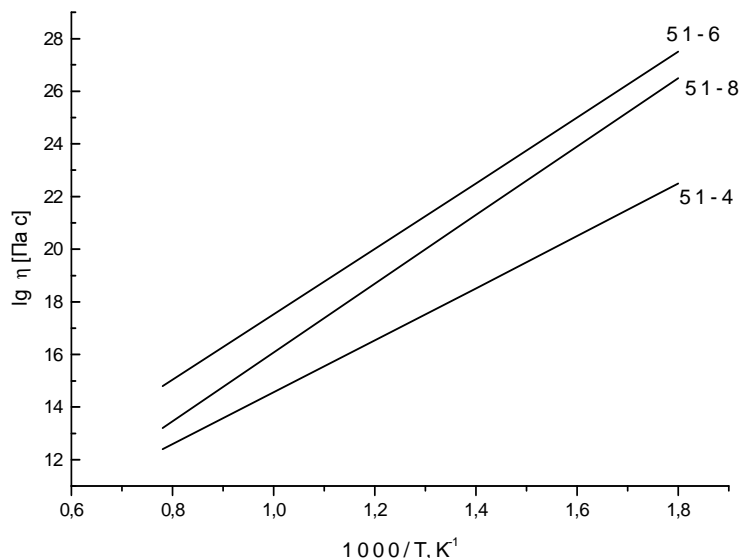


Рис.2 температурная зависимость диффузионной вязкости дайковых пород.

. Работа поддержана Программой Президиума РАН П-09 «Исследование вещества в экстремальных условиях» подпрограмма « Физика и механика сильносжатого вещества и проблемы внутреннего строения Земли и планет».

#### Литература

1. Чихрадзе Г. А. О диабазовых (долеритовых) дайковых породах верховьев р. Ассы //Сообщ. АН ГССР. 1988.т.129, № 2. С. 365-368.
2. Кашкай М.А., Магомедов.А.М., Айтеков М.-П.Б., Батырмурзаев А.С. Радиоактивные элементы и формы их нахождения в дайковых породах Южного Дагестана // Докл. АН Аз.ССР. 1975. Т.31. №12. С. 42-47.
3. Гусейнов А.А. Исследование электропроводности биотитов при высоких температурах // Физика Земли. 1999. № 11. С. 75-82.
4. Гусейнов А.А., Гаргацев И.О., Габитова Р.У. Исследование электропроводности флогопитов при высоких температурах // Физика Земли. 2005. №8. С. 79-88.
5. Гусейнов А.А., Гаргацев И.О. исследование особенностей электропроводности щелочных полевых шпатов при высоких температурах // Физика Земли. 2002. № 6. С.82-86.
6. Пархоменко Э.И. Геоэлектрические свойства минералов и горных пород при высоких давлениях и температурах. М.: Наука. 1989. 198 с.
7. Жарков В.Н., Трубицын В.П. Физика планетных недр. М.: Наука, 1980. 448 с
8. Артюшков Е.В. Физическая тектоника. М.: Наука, 1993. 456 с.
9. Пуарье Ж.-П. Ползучесть кристаллов. Механизмы деформации металлов, керамики и минералов при высоких температурах. М.: Мир, 1988. 287 с.
10. Добержинецкая Л.Ф. Деформации магматических пород в условиях глубинного
11. Гордиенко В.В. О вязкости вещества верхней мантии // Геофизич. журн. 1985. Т. 7. № 4. С. 37-42.
12. № 4. С. 37-42.
13. Лифшиц И.М.К теории диффузионно-вязкого течения поликристаллических тел // ЖЭТФ. 1963. Вып.4. С. 1349-1367.
14. Гусейнов А.А. Определение диффузионной вязкости горных пород по данным электропроводности // Физика Земли. 1997. № 7. С. 92-96.

#### Соляные купола Северного Кавказа

Ф.Я. Корытов, А.Б. Дзайнуков

(Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва)

Во всех континентах, океанах и морях известны соляные купола. Они приурочены к нефтегазонасыщенным рифтовым структурам, где широко проявлены галогенные породы в форме простых и сложных залежей, включая субвертикальные дайки и штоки. Значительное количество их имеется в Казахстане, США, Китае, Мексике, Германии, Румынии, Иране и Украине. В России они существуют во многих регионах, включая Прибайкалье, Забайкалье, Северо-Восток и Северный Кавказ.

В зависимости от времени формирования и степени денудационного среза соляные купола могут выходить на поверхность, но большинство их является скрытыми («слепыми») или погребенными.