

## Комплекс экспериментальных исследований электрических свойств горных пород в инертной среде

© М. В. Кравчук, В. А. Корчин, В. П. Коболев, Н. И. Новик, 2018

Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 2 октября 2017 г.

Детально описано конструкцию і розглянуто апаратурно-методичні особливості розробленого і реалізованого в Інституті геофізики НАН України автоматизованого вимірювального комплексу, призначеного для дослідження електричних параметрів мінеральної речовини за температур до 1100 °С у кисневмісному та інертному середовищах. Наведено результати деяких експериментів, виконаних на етапі дослідних випробувань комплексу в температурному інтервалі від кімнатної до 700 °С. Досліджено та проаналізовано чинники, що впливають на характер отриманих температурно-частотних залежностей електричних параметрів зразків порід. Показано, що утворення оксидів у кисневмісному середовищі збільшує електричний опір. Різниця градієнта зміни величини  $\rho$  від температури, особливо в інтервалі 300—500 °С, зумовлена тим, що електропровідність здійснюється в основному іонами домішок і дефектами кристалічної ґратки. За підвищення температури діелектрична проникність іонних кристалів зростає внаслідок ослаблення зв'язку між окремими іонами. Низькочастотна діелектрична проникність найчутливіша до деформаційних фазових переходів і є інформативнішим параметром, оскільки змінюється з найбільшим градієнтом.

**Ключові слова:** *PT*-петрофізика, електричні параметри, вимірювальний комплекс, інертне середовище.

**Введение.** Изучение электрических параметров минерального вещества, их изменений и взаимосвязей в широком диапазоне температур и давлений является неотъемлемой составной частью фундаментальных комплексных геофизических исследований глубинного строения Земли.

Возможности экспериментальной *PT*-петрофизики с целью прогнозирования распределения физических свойств и состава геологической среды на различных глубинах далеко не исчерпаны [Корчин и др., 2011, 2013], но требуют более тщательного подхода к чистоте экспериментальных измерений в различных термодинамических и физико-химических обстановках. Прежде всего, это касается влияния

окислительных процессов при воздействии высоких температур в процессе экспериментальных измерений электрических свойств пород. Это обстоятельство предопределило задачу создания экспериментального комплекса для измерения электрических параметров образцов минералов и горных пород при их нагреве в нейтральной среде.

Для устранения влияния окислительных процессов при изучении электрических свойств минеральных образований при высоких температурах в качестве нейтральной среды используется аргон [Shanov et al., 2000]. Это позволяет минимизировать окислительные процессы в образцах горных пород при воздействии высо-

ких температур, так как окисление железосодержащих минералов в этом случае будет обусловлено главным образом внутренним кислородным потенциалом.

В настоящей статье рассмотрены аппаратно-методические особенности разработанного и реализованного в Институте геофизики НАН Украины автоматизированного измерительного комплекса, предназначенного для исследования электрических параметров минерального вещества при температурах до 1100 °С в нейтральной среде [Кравчук, Корчин, 2014].

**Конструкция измерительного комплекса.** При создании измерительного комплекса максимально использована современная высокоточная измерительная аппаратура с автоматической регистрацией и последующей обработкой результатов измерений на компьютере.

На рис. 1 приведена блок-схема автоматизированного комплекса измерения электрических параметров минерального вещества при высоких температурах с использованием нейтральной среды.

Блок нагрева обеспечивает регулирование температуры образца, контроль подачи инертного газа (аргона) в камеру печи, а также измерение и передачу исходных данных на компьютер. Результаты измерений, наряду с исходными данными текущего температурного режима блока нагрева, регистрируются в базе данных компьютера. Последний обеспечивает ав-

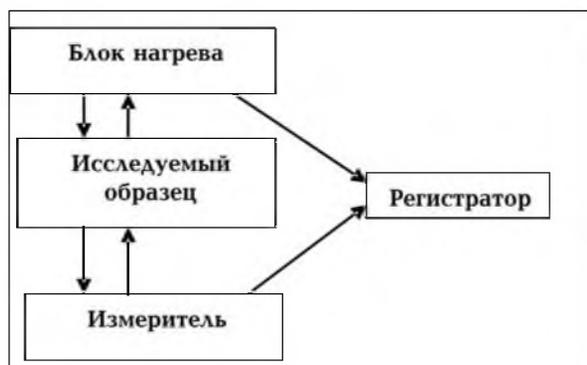


Рис. 1. Блок-схема автоматизированного комплекса измерения электрических параметров минерального вещества.

томатическое согласование и обработку полученной от нагревательного и измерительного блоков информации.

При конструировании блока нагрева большое внимание уделялось подбору материалов и дополнительных устройств, которые могли бы соответствовать предъявляемым техническим требованиям. Футеровка печи выполнена из смеси порошка электрокорунда, шамотной огнеупорной глины (мергеля), жидкого стекла и воды. Держатели электродов изготовлены из пирофиллита ( $H_2Al_2(SiO_3)_4$  гидросиликат алюминия), который прост в обработке и приобретает хорошую прочность и устойчивость к нагрузкам после закалки, а также имеет хорошие термо- и электроизоляционные свойства. В качестве термоизоляции камеры нагрева были выбраны асбест и базальтовая вата. Сконструированная система рычагов, шарниров и пружин прижимного устройства позволила обеспечить максимально плотное прилегание электродов к граням образца породы с необходимым свободным ходом для компенсации влияния линейного теплового расширения.

Подача инертного газа в камеру нагрева контролируется и регулируется ротаметром РМ 0,63 (УЗ ГОСТ 13 045-81). Используемая модель представляет собой стеклянную трубу с кольцевыми уплотнениями. Сечение трубы с тремя гранями, параллельными центральной оси, обеспечивает самоцентрирование поплавка в потоке. Такая конструкция позволяет проводить измерения давления газа в камере с высокой точностью. Опциональный защитный прозрачный кожух из поликарбоната обеспечивает обзор 180°. Ротаметр оснащен кольцевыми уплотнениями и сигнализаторами предельных значений расхода газа. Замена трубки и поплавка может производиться без демонтажа корпуса.

Контроль температуры в камере нагрева осуществляется многофункциональным двухканальным измерителем-регулятором ОВЕН 2ТРМ1 с универсальными измерительными входами (Руководство по эксплуатации, ОВЕН 2ТРМ1). По устойчивости

к электромагнитным воздействиям и уровню излучаемых радиопомех он соответствует оборудованию класса В по ГОСТ 29216. Предел основной приведенной погрешности при работе с термоэлектрическими преобразователями составляет  $\pm 0,5\%$ , термопреобразователями сопротивления и унифицированными сигналами постоянного напряжения и тока —  $\pm 0,25\%$ .

Электрические характеристики исследуемого образца горной породы измеряются прибором RLC-meter МНС-1100 [Руководство ..., 2008]. RLC-метр предназначен для автоматического определения параметров импеданса (емкости (С), индуктивности (L), активного сопротивления (R), взаимной индуктивности (M), тангенса угла потерь ( $\text{tg}\delta$ ) и тангенса угла фазового сдвига ( $\text{tg}\varphi$ ) (добротности ( $Q_C$  и  $Q_L$ )) по любой из двухэлементных схем замещения, а также процентных отклонений с представлением результатов измерений в цифровом виде. RLC-метр обеспечивает: автоматический выбор характера реактивности объекта измерений по критерию "превалирующий параметр"; учет начальных параметров; усреднение результатов измерений; устранение влияния сетевых помех (на отдельных оговоренных частотах); измерение с регулировкой значения напряжения переменного тока, подаваемого на объект измерения. Прибор имеет два режима измерений: разовый — для измерения неизвестных величин; следящий — для непрерывного измерения изменяющихся во времени величин, обеспечивает четырехпарное подключение объекта измерения и может подключаться к ПК через последовательный интерфейс RS232. Основные технические характеристики прибора представлены в таблице.

Связь RLC-метра МНС-1100 с компьютером осуществляется по протоколу MODBUS RTU. МНС-1100 определен как ведомое устройство и отвечает на запросы, поступающие от ведущего устройства (ПЭВМ). Обмен между устройством и ПЭВМ состоит из двух сообщений. Первое — запрос, который поступает от ПЭВМ к ведомому

устройству. Второе — одиночный ответ, который поступает от ведомого устройства к ПЭВМ. Оба отформатированы как сообщения протокола MODBUS, называемые пакетами. Каждый пакет состоит из последовательности байтов, сгруппированных в четыре поля, описанных ниже.

**Адресное.** Состоит из одного байта. В формате пакета этот байт определяет адрес устройства, к которому направляется запрос. Каждому ведомому устройству в протоколе MODBUS присваивается свой неповторяющийся адрес.

**Функциональное поле.** Состоит из одного байта. Определяет функцию, которую ведомое устройство должно выполнить. Если ведомое устройство может выполнить запрашиваемую функцию, то функциональное поле ответа будет таким же, как и поле запроса, если не может, то функциональное поле возвращается с единицей в старшем разряде. Это сообщает ПЭВМ, что ведомое устройство возвращает сообщение об ошибке.

**Поле данных.** Длина поля зависит от типа функции.

**Поле проверки.** Значение этого поля вычисляется путем выполнения циклического контроля (CRC-16).

Синхронизация пакетов осуществляется за счет задания ограничения интервала

#### Основные технические характеристики RLC-метра МНС-1100

Измеряемая величина	Диапазон
$R$ , Ом	От $1 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{11}$
$C$ , Ф	От $1 \cdot 10^{-17}$ до 10
$R_{\text{пт}}$ , Ом	От $1 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{11}$
$\text{tg}\delta$ , отн. ед.	От $1 \cdot 10^{-5}$ до 65535
$\text{tg}\varphi$ , отн. ед.	От $1 \cdot 10^{-5}$ до $\pm 65535$
Процентные отклонения	$\pm 100$

ла времени между последовательными байтами в пределах одного сообщения. Если за время, необходимое на прием трех байт, не будет распознан новый, то следующий принятый байт будет рассматриваться как адресное поле нового сообщения.

Для записи данных, полученных в процессе измерений, используется приложение "RLC-Meter". В результате получаем файл в текстовом формате, с которым можно работать в любом табличном редакторе (например в Microsoft Office Excel).

Принципиальная схема конструкции автоматизированного комплекса измере-

ния электрических свойств (АКИЭС) приведена на рис. 2.

Основными структурными элементами комплекса являются: блок нагрева, измеритель и регистратор (компьютер). Электрический нагреватель (1) представляет собой раздвижную термоизолирующую камеру с нихромовой спиралью диаметром 1 мм, которая намотана на кварцевую трубку и помещена в армированный цилиндрический корпус, футерованный высокотемпературной обмазкой. Дополнительно надежная теплоизоляция обеспечивается базальтовой ватой. Верхняя часть термо-

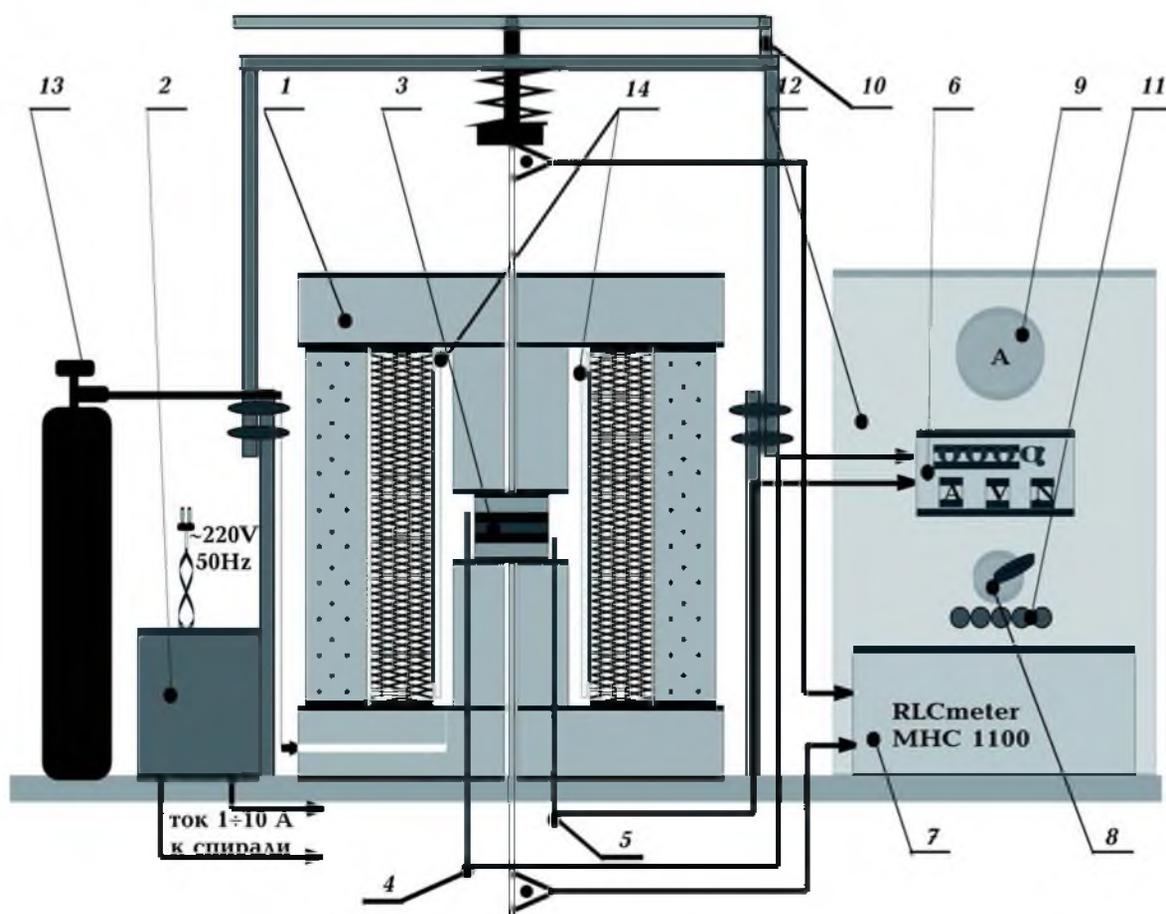


Рис. 2. Принципиальная схема конструкции автоматизированного комплекса измерения электрических свойств (АКИЭС): 1 — нагреватель электрический (спираль — нихром); 2 — регулятор тока тиристорный БУ3509-3282УХЛ4; 3 — образец породы; 4 — термопара ХА (верхняя); 5 — термопара ХА (нижняя); 6 — измеритель-регулятор 2ТРМ1; 7 — прибор RLC-meter МНС-1100; 8 — потенциометр установки тока нагревателя; 9 — амперметр контроля тока; 10 — прижимное устройство; 11 — клемники для четырехпарного подключения RLC-метра; 12 — приборная панель; 13 — баллон нейтрального газа; 14 — кварцевая трубка.

камеры защищена асбестовой крышкой (толщиной 30 мм), в которую вмонтирован пирофиллитовый держатель электродов. В нижней части термокамеры есть отверстие с конической фаской, которая при опускании камеры на нижний опорный держатель центрирует электроды. В качестве источника питания постоянного тока используется тиристорный регулятор (2), обеспечивающий нагрев исследуемого образца породы до 1100 °С.

Образец (3) размещается внутри камеры нагрева между никелевыми или графитовыми электродами. Температура образца контролируется термопарами (4, 5), термоэдс от которых усредняется и поступает на многофункциональный двухканальный измеритель-регулятор 2ТРМ1 (6). Измеритель-регулятор работает в режиме контроля или регулирования температуры образца по заданной программе. Изучаемые параметры образца фиксируются прецизионным прибором МНС-1100 (7). Никелевые электроды и нихромовые токоподводы позволяют проводить исследования до температуры 1100 °С. Ток нагревательной спирали устанавливается переменным резистором (8) и контролируется амперметром (9). С помощью тумблеров установка включается в режим контроля или автоматического регулирования температуры нагрева. Приборы размещены на панели (12). Для устранения влияния окислительных процессов при нагреве образцов в начале опытов в камеру нагревателя из баллона (13) подается аргон под регулируемым избыточным давлением. По окончании процесса измерений верхняя часть нагревателя поднимается специальным подъемным механизмом и образец извлекается из камеры нагрева.

**Результаты испытаний.** Установка прошла опытные испытания на соответствие планируемым параметрам. Измерения температурных зависимостей электрических характеристик горных пород важно проводить в зоне с наименьшим градиентом для обеспечения равномерного нагрева образца. С целью определения такой зо-

ны независимой термопарой были сделаны замеры температуры вдоль ствола печи с шагом 10 мм. При фиксированных температурах в измерительной ячейке — 250, 500 и 700 °С (контроль производился многофункциональным двухканальным измерителем-регулятором ОВЕН 2ТРМ1) и для каждой зафиксированной температуры были построены кривые ее изменений (рис. 3), из которых следует, что зона с наименьшим температурным градиентом находится на уровне 100—150 мм от дна камеры и пространственно совпадает с измерительной ячейкой.

Полученные результаты тарировки установки позволили перейти к отработке методики измерений электрических параметров горных пород.

В качестве материала для эксперимента были подобраны образцы габбро (среднезернистый), базальта (мелкозернистый) и розового кварцита (мелкозернистый мономинеральный). Кварциты (овручская серия верхнего протерозоя) отобраны в северной части северо-западного района Украинского щита (УЩ); базальты (вендская траптовая формация) — в пределах западного склона УЩ; габбро (букинский

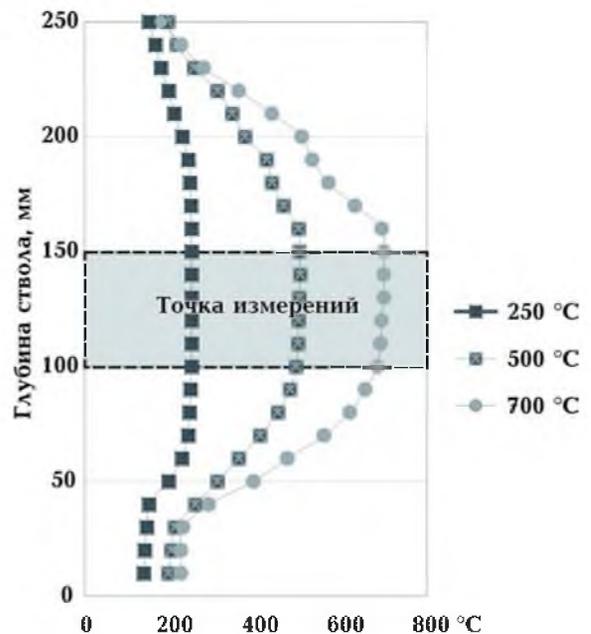


Рис. 3. Температурный градиент в стволе печи.

комплекс нижнего протерозоя) — в пределах южной части северо-западного района УЩ. Из блоков пород были изготовлены шлифы, по которым выполнено их петрографическое описание. Исследованный образец розового кварцита представляет собой мелкозернистую мономинеральную породу гранобластовой структуры, состоящую из изометричных неправильной формы (часто угловатых) зерен кварца. Габбро — средне-зернистая порода, состоящая из аллотриоморфных, реже призматических и таблитчатых зерен плагиоклаза, пироксена, а также зерен рудного минерала, апатита и чешуек биотита. Базальт представлен мелкозернистой разновидностью, состоящей из большого количества беспорядочно расположенных лейст плагиоклаза, в угловатых промежутках между которыми присутствуют пироксен и рудный минерал. Образцы изготавливались в форме дисков диаметром 21 мм и высотой от 4 до 14 мм, по несколько дублей разной высоты. Пробы брались естественно-сухими. Образцы помещались в камеру нагрева, куда подавался аргон. Производились измерения их электрических характеристик с повышением температуры (с шагом 50 или 100 °С). Скорость нагревания — 10 град / мин. В каждой "температурной точке" измерений делались десятиминутные временные выдержки для равномерного распределения тепла по объему образца.

**Результаты экспериментальных исследований.** Удельное электрическое сопротивление образцов пород определялось по измеренным значениям электрического сопротивления по формуле  $R = \rho l / S$ , где  $S$  — площадь электродов;  $l$  — толщина образца. Относительная диэлектрическая проницаемость рассчитывалась по формуле для емкости плоского конденсатора:  $C_x = \epsilon \epsilon_0 \cdot S / l$ . Полученные данные обрабатывались в приложении Microsoft Office Excel.

В ходе эксперимента для некоторых пород были получены частотные температурные зависимости удельного электрического сопротивления ( $\rho$ ) на постоянном

токе и частотах 100 Гц, 1, 10 и 100 кГц, а также относительной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon$ ) на частотах от 100 Гц до 100 кГц (рис. 4—7). Изучение электрических параметров в выбранном частотном диапазоне (от 0 до 100 кГц) представляет особый интерес, так как именно он преобладает при геоэлектрических исследованиях земной коры [Шепель, Кравчук, 2007].

Характерная особенность кривых электросопротивления образца розового кварцита — наличие "провала" в интервале температур 400—600 °С (рис. 4, а), что предположительно связано с полиморфным переходом (573 °С)  $\alpha$ -кварца в  $\beta$ -кварц ( $\alpha$ -SiO<sub>2</sub> ↔  $\beta$ -SiO<sub>2</sub>). Этот фазовый переход является деформационным, затрагивающим первую координационную сферу. Деформационные переходы происходят без разрыва химической связи, путем ее искажения. При таких переходах происходит лишь небольшое изменение кристаллической решетки. Энергия активации таких переходов мала, поэтому они относятся к "быстрым переходам" [Гуфан, 1982; Жданов, 1988].

В этой температурной области также можно наблюдать скачкообразное увеличение относительной диэлектрической проницаемости от единиц до нескольких десятков (рис. 4, б), что характерно для сегнетоэлектрической точки Кюри [Павлов, Хохлов, 2000]. Наиболее выражена эта аномалия в области низких частот.

Температурно-частотные зависимости электрических характеристик образцов габбро представлены на рис. 5, 6. Один из дублей породы исследовался в инертной среде (рис. 5, а), а другой — без подачи аргона в камеру нагрева (рис. 5, б). В области поляронной проводимости (20—200 °С) вначале происходит понижение электрического сопротивления пород (интервал температур 20—100 °С), а затем увеличение, что связано с удалением влаги, присутствующей на границах зерен. Кривые электросопротивления образца, исследованного в окислительной среде, отличаются большим количеством изло-

мов с разным углом наклона кривых. Это соответствует разным энергиям активации токоносителей и, возможно, связано с окислительными процессами при более высокой концентрации кислорода [Кравчук, Корчин, 2015].

Образование оксидов в кислородсодержащей среде повышает электрическое сопротивление, что обусловлено ионными связями при малых ионных радиусах катионов, обладающих незначительной поляризуемостью [Пархоменко, 1984].

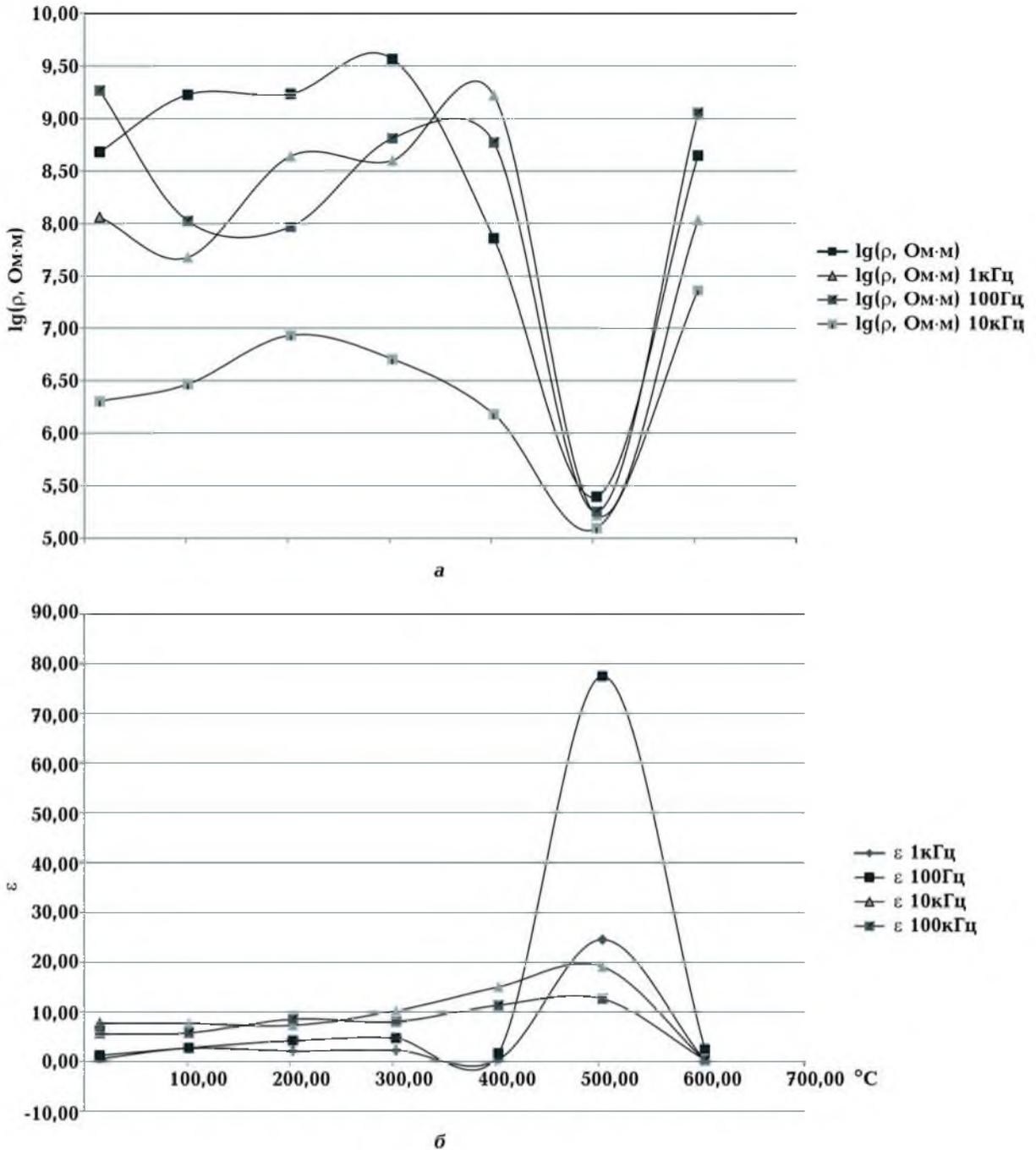


Рис. 4. Температурно-частотные зависимости логарифма электрического сопротивления (а) и относительной диэлектрической проницаемости (б) образца розового кварцита.

Характер зависимости от температуры и частоты электрических параметров образца базальта схож с аналогичными зависимостями для габбро, что связано с подобностью минерального состава исследованных пород (рис. 7).

В низкотемпературной области в образцах вначале наблюдается уменьшение электрического сопротивления (при температурах до 100 °С) и некоторое его увеличение в результате удаления влаги из открытых пор (до 200 °С). С дальнейшим

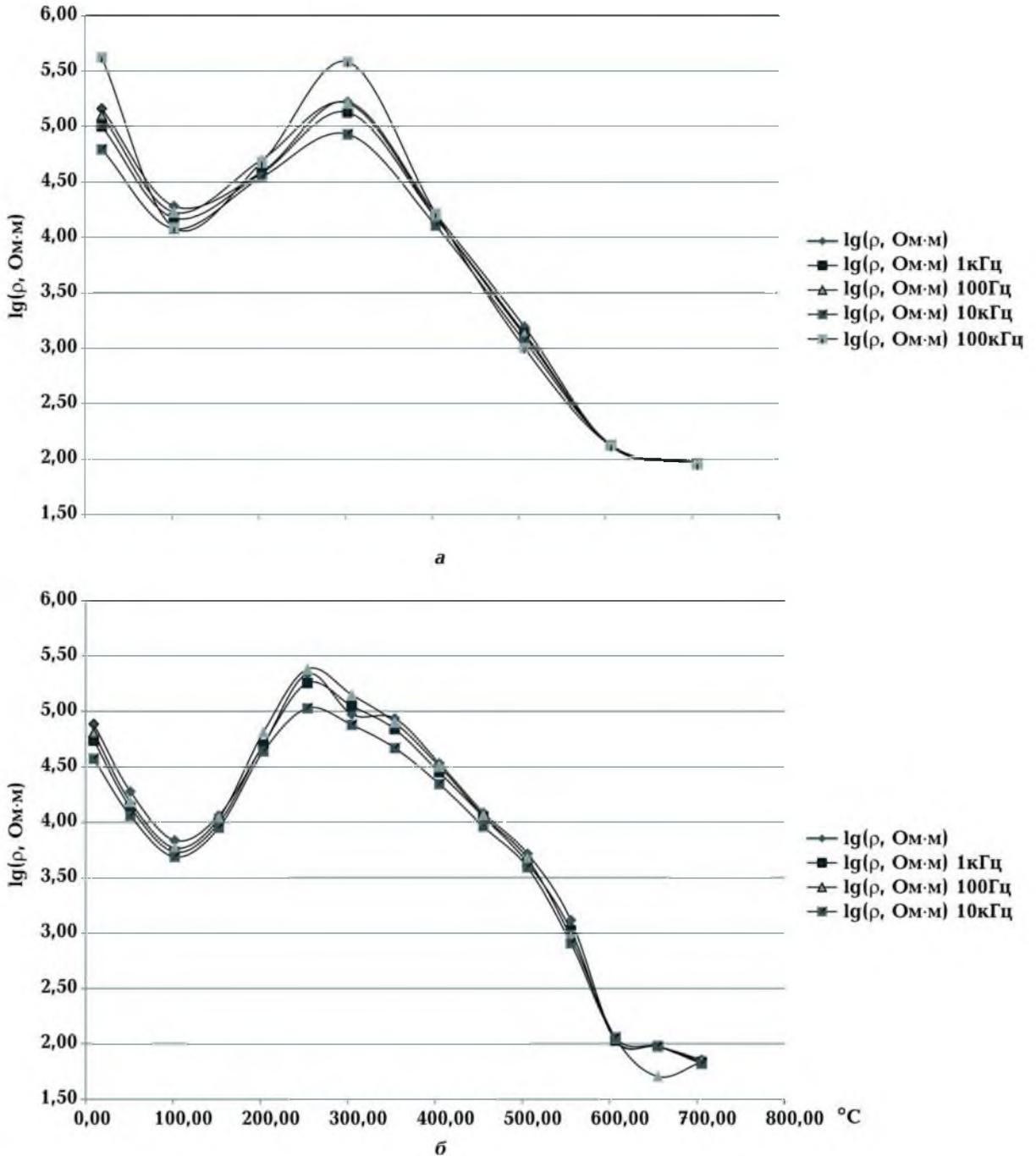


Рис. 5. Температурно-частотные зависимости логарифма электрического сопротивления образца габбро: в инертной среде (а), в окислительной (б).

повышением температуры электрическое сопротивление равномерно падает. Характер кривых диэлектрической проницаемости обратный — с повышением температуры  $\epsilon$  увеличивается, что характерно для ионно-релаксационного механизма по-

ляризации, наблюдаемом в ионных диэлектриках с неплотной упаковкой ионов в кристаллической решетке. При этом низкочастотная диэлектрическая проницаемость увеличивается с наибольшим градиентом.

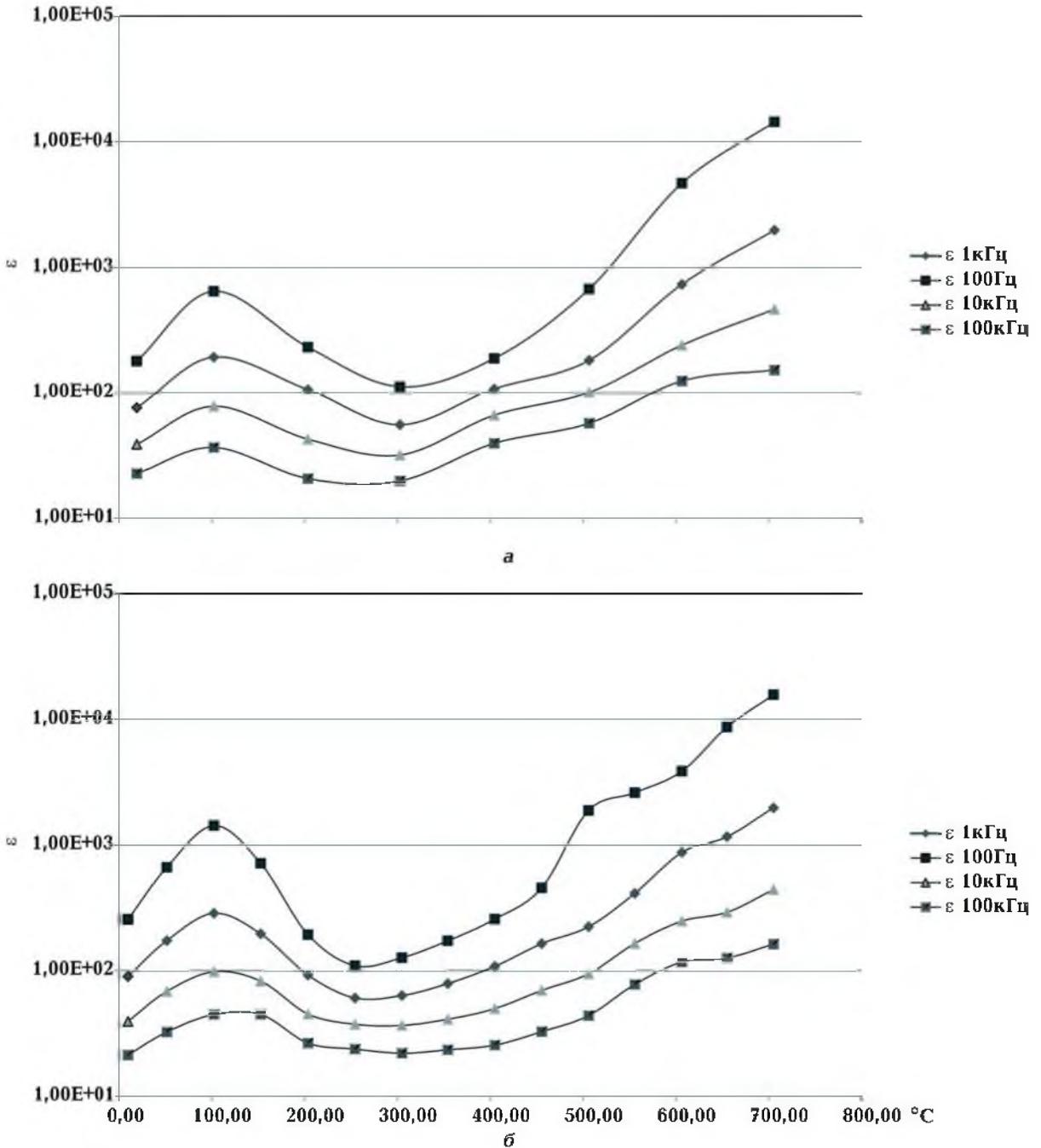


Рис. 6. Температурно-частотные зависимости относительной диэлектрической проницаемости образца габбро: в инертной среде (а), в окислительной (б).

**Обсуждение результатов.** Большинство минералов и горных пород являются ионными кристаллическими диэлектриками. Ионная электропроводность, как правило, испытывает увеличение с температурой. Однако на кривых электросопротивления выделяют несколько разноградиентных областей, в которых элект-

рическое сопротивление приближенно является линейной функцией температуры.

Очевидно, области различаются типом электропроводности. Выделяют три типа последней: поляронная, примесная и собственная.

1. *Поляронная проводимость.* Осуществляется электронами или ионами, колеб-

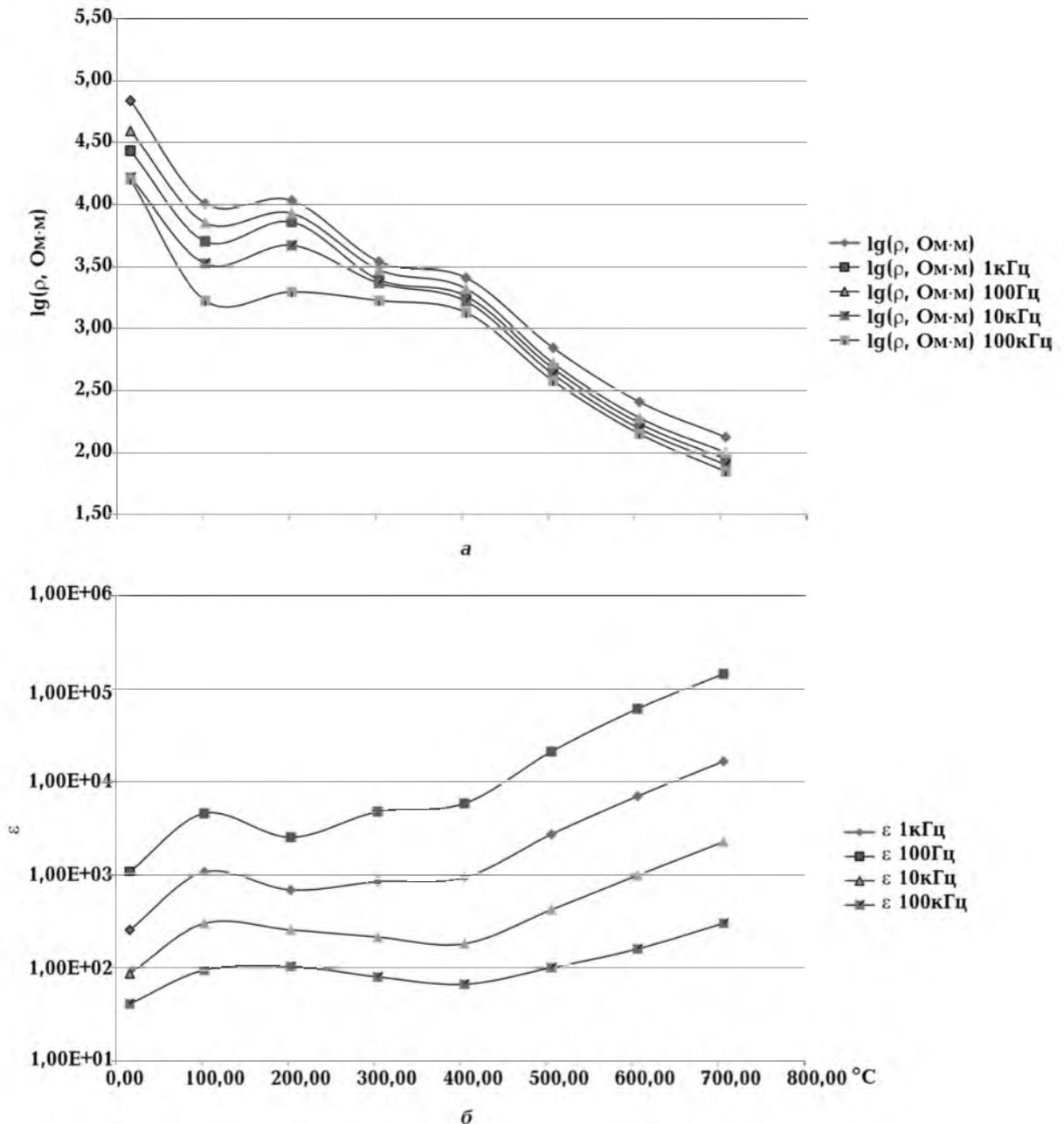


Рис. 7. Температурно-частотные зависимости электрических характеристик образца базальта: а — зависимости логарифма электрического сопротивления, б — диэлектрической проницаемости.

лющимися в фононном поле кристаллической решетки, характерна для низкотемпературной области (от комнатной до 200 °С). Во многих диэлектриках подвижность электронов и дырок чрезвычайно мала — в сотни и даже тысячи раз ниже, чем в полупроводниках. Столь низкие значения подвижности связаны с тем, что электроны находятся в этих веществах в связанном состоянии, образуя квазичастицы (поляроны). Таким образом, кроме электронного механизма проводимости в диэлектриках может существовать также и другой механизм переноса заряда, получивший название поляронного. Поляронная проводимость возникает в том случае, когда электроны или дырки сильно связаны с кристаллической решеткой. При низкой концентрации свободных носителей заряда в диэлектриках может существовать электрическое поле, приводящее к смещению связанных зарядов (поляризации). В ряде случаев электроны проводимости поляризуют своим полем окружающую их область диэлектрика и локализуются в ней. Эта область искаженной решетки вместе с находящимся в ней электроном (или дыркой), вызвавшим искажение, и получила название полярона. Под действием электрического поля электрон перемещается вместе с поляризованной областью, т. е. происходит движение полярона.

Поляронная проводимость характерна для ионных кристаллов, где кулоновское взаимодействие между электронами и ионами, образующими кристаллическую структуру, особенно велико [Павлов, Хохлов, 2000].

**2. Примесная проводимость (200—600 °С).** Электропроводность в диэлектриках осуществляется в основном ионами примесей деполяризацией за счет дефектов кристаллической решетки.

**3. Собственная проводимость.** Электропроводность формируется за счет основных ионов кристаллической решетки (интервал более высоких температур).

На процесс проводимости в горных породах в общем случае накладывается по-

ляризация, обуславливаемая либо ориентацией диполей, либо смещением зарядов относительно друг друга. Поэтому на зависимостях  $\lg \rho = f(T)$  габбро и базальта в интервале температур 200—400 °С наблюдаются локальные максимумы электросопротивления. Проводимость диэлектрика при переменном токе (так называемая активная удельная проводимость) складывается как из истинной омической проводимости, вызванной перемещением носителей заряда, так и из потерь энергии, связанных с дисперсией. Скорость распространения зондирующих диэлектрическую среду электромагнитных волн зависит только от ее относительной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon$ ), которая характеризует свойство вещества поляризовываться в электрическом поле. Поскольку поляризация представляет собой инерционный процесс, то для ее развития требуется определенное время. Количественно запаздывание становления поляризации характеризуется временем релаксации  $\tau$ , в течение которого поляризация спадает после прекращения действия поля.

Различают несколько видов поляризации, основными из которых являются:

- электронная, вызванная смещением в электрическом поле электронных оболочек атомов относительно атомных ядер и характерная для всех атомов ( $\tau \approx 10^{-14} \div 10^{-15}$  с);
- ионная, наблюдаемая в ионных кристаллах, обусловлена упругим смещением в электрическом поле разноименных ионов из их положений равновесия в противоположных друг относительно друга направлениях ( $\tau \approx 10^{-12} \div 10^{-13}$  с);
- атомная, обусловленная смещением атомов разного типа в молекуле под действием электрического поля ( $\tau \approx 10^{-12} \div 10^{-13}$  с);
- ориентационная, характерная для полярных диэлектриков (жидкостей и газов), состоящих из молекул с постоянными электрическими дипольными моментами, а также для кристаллов, в

которых дипольные моменты могут поворачиваться;

— релаксационная (тепловая), обычно наблюдаемая у ионных кристаллов, где слабосвязанные ионы могут иметь несколько равновесных положений, в которые они переходят скачкообразно. Для двух последних видов поляризации значения  $\tau$  лежат в очень широких пределах ( $\tau \approx 10^{-2}—10^{-12}$  с) и существенным образом зависят от температуры.

В переменных электромагнитных полях высоких частот, когда поляризация из-за свойственной ей инерционности начинает отставать от поляризующего поля, в токе смещения появляется компонента, сдвинутая по сравнению с поляризующим полем на  $90^\circ$ , которая по направлению совпадает с током проводимости [Аузин, Зацепин, 2015]. Поэтому повышение температуры увеличивает межатомные расстояния, вследствие чего связь между отдельными ионами ослабляется, взаимное смещение ионов под действием внешнего электрического поля облегчается, в результате диэлектрическая проницаемость ионных кристаллов возрастает. Это подтверждается и зависимостями  $\epsilon = f(T)$ .

**Выводы.** Созданный экспериментальный комплекс для исследования электрических параметров образцов минералов и горных пород в широком диапазоне темпе-

ратур в нейтральной и кислородной среде позволяет исследовать образцы минерального вещества в низкочастотном спектре электромагнитных волн, что дает возможность получить необходимую новую информацию о природе происходящих процессов. При некоторой доработке этот комплекс будет использован для изучения электрических характеристик горных пород при одновременном воздействии давлений и температур, моделирующих термодинамические условия глубинных горизонтов земной коры. Основными факторами, влияющими на характер полученных зависимостей электрических параметров исследованных образцов, являются влажность, минеральный состав, содержание кислорода и температура. С увеличением частоты приложенного электрического поля значения электрических параметров образца уменьшаются, что свидетельствует о преобладании емкостной составляющей импеданса. Показано, что образование оксидов в кислородсодержащей среде увеличивает электрическое сопротивление. При повышении температуры диэлектрическая проницаемость ионных кристаллов возрастает, что связано с ослаблением связи между отдельными ионами. Низкочастотная диэлектрическая проницаемость наиболее чувствительна к деформационным фазовым переходам.

### Список литературы

- Аузин А. А., Зацепин С. А. О дисперсии диэлектрической проницаемости геологической среды (применительно к интерпретации материалов георадиолокации). *Вестник ВГУ. Сер. геология*. 2015. № 4. С. 122—127.
- Гуфан Ю. М. Структурные фазовые переходы. Москва: Наука, 1982. 304 с.
- Жданов Г. С., Хунджуа А. Г. Лекции по физике твердого тела: Принципы строения, реальная структура, фазовые превращения. Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1988. 231 с.
- Корчин В. А., Буртный П. А., Коболев В. П. Термобарическое петрофизическое моделирование в геофизике. Киев: Наук. думка, 2013. 303 с.
- Корчин В. А., Карнаухова Е. Е., Нех А. С., Кравчук М. В. Новые аппаратно-методические разработки исследования физических характеристик горных пород при высоком давлении и температуре: *Материалы 12-й Международной конф. "Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле"*. Москва, 2011. С. 145—148.
- Кравчук М. В., Корчин В. А. Аппаратно-методические особенности исследования температурных изменений электрических параметров горных пород в инертной и окис-

лительной средах: *Материалы Междунар. науч.-практ. конф. "Современное состояние и актуальные направления геологического изучения и комплексного освоения ресурсов недр стран СНГ"*, 13—15 ноября, 2013. Минск, 2014. С. 90—93.

Кравчук М. В., Корчин В. А. Информативность исследования электрических свойств горных пород в инертной среде: *14<sup>th</sup> EAGE International Conference on Geoinformatics — Theoretical and Applied Aspects 1 — Geoinformatics — an Innovative View of the Earth* (11 мая 2015).

Павлов П. В., Хохлов А. Ф. Физика твердого тела. Москва: Высшая школа, 2000. 494 с.

Пархоменко Э. И. Электрические свойства ми-

нералов и горных пород. В кн.: *Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика)*. Под ред. Н. Б. Дортман. Москва: Наука, 1984. С. 261—269.

*Руководство по эксплуатации RLC-метра МНС-1100*. Киев, 2008. promix.com.ua.

Шепель С. И., Кравчук М. В. Глубинные изменения электрических параметров кристаллических пород и природа аномалий электропроводности в земной коре. *Геофиз. журн.* 2007. Т. 29. № 3. С. 67—77.

Shanov S., Yanev Y., Lastovickova M., 2000. Temperature dependence of the electrical conductivity of granite and quartz-monzonite from south Bulgaria: geodynamic inferences. *J. Balkan Geophys. Soc.* 3(2), 13—19.

## A system of experimental studies of electric properties of rocks in the inert medium

© M. V. Kravchuk, V. A. Korchyn, V. P. Kobolev, N. I. Novik, 2018

In the work presented, the construction and the hardware-methodological features of the automated measuring system developed and realized at the Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine designed to study electrical parameters of the mineral substance at temperatures up to 1100 °C in oxygen-containing and inert media are described in detail. The results of some experiments performed at the stage of experimental tests of the complex in the temperature range from room temperature to 700 °C are shown. The factors influencing the character of the obtained temperature-frequency dependences of the electrical parameters of the investigated samples are considered and analyzed. It is shown that the formation of oxides in an oxygen-containing medium increases the electrical resistance. The difference in the gradient of the change in  $\rho$  from the temperature, especially in the range 300—500 °C, is due to the fact that the electrical conductivity is carried out mainly by impurity ions and crystal lattice defects. As the temperature is raised, the dielectric constant of ionic crystals increases, which is due to the weakening of the bond between the individual ions. Low-frequency permittivity is the most sensitive to deformation phase transitions and is a more informative parameter, since it varies with a larger gradient.

**Key words:** *PT*-petrophysics, electric parameters, measuring complex, inert medium.

### References

Auzin A. A., Zatsepin S. A., 2015. About the dispersion of dielectric permeability of a geological environment (in connection with interpretation of GRP materials). *Vestnik VGU. Ser. geologiya* (4), 122—127 (in Russian).

Gufan Yu. M., 1982. Structural phase transitions. Moscow: Nauka, 304 p. (in Russian).

Zhdanov G. S., Khundzhua A. G., 1988. Lectures on solid state physics: Principles of structure

- re, real structure, phase transformations. Moscow: Publ. House Moscow University, 231 p. (in Russian).
- Korchin V.A., Burtnyy P.A., Kobolev V.P., 2013. Thermobaric Petrophysical Modeling in Geophysics. Kiev: Naukova dumka, 303 p. (in Russian).
- Korchin V.A., Karnaukhova Ye. Ye., Nekh A.S., Kravchuk M.V., 2011. New instrumentation and methodological development of the study of physical characteristics of rocks under high pressure and temperature: *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference "Physical and Chemical and Petrophysical studies in the Earth sciences"*. Moscow, P. 145—148 (in Russian).
- Kravchuk M.V., Korchin V.A., 2014. Instrument-methodological features of studying the temperature changes in the electrical parameters of rocks in the inert and oxidizing environments: *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Current state and current trends in geological study and integrated development of subsoil resources of the CIS countries"*, 13—15 November, 2013. Minsk, P. 90—93 (in Russian).
- Kravchuk M.V., Korchin V.A., 2015. Informativity of the study of electrical properties of rocks in an inert medium: *14<sup>th</sup> EAGE International Conference on Geoinformatics — Theoretical and Applied Aspects 1 — Geoinformatics — an Innovative View of the Earth (May 11, 2015)*.
- Pavlov P.V., Khokhlov A.F., 2000. Solid State Physics. Moscow: Vysshaya shkola, 494 p. (in Russian).
- Parkhomenko E.I., 1984. Electrical properties of minerals and rocks. In: *Physical properties of rocks and minerals (petrophysics)*. Ed. N.B. Dortman. Moscow: Nauka, P. 261—269 (in Russian).
- Operating Instructions RLC-meter MNS-1100. Kyiv, 2008. promix.com.ua.
- Shepel S.I., Kravchuk M.V., 2007. Deep changes electrical parameters of crystalline rocks and the nature of the anomalies of electrical conductivity in the Earth's crust. *Geofizicheskij zhurnal* 29 (3), 67—77 (in Russian).
- Shanov S., Yanev Y., Lastovickova M., 2000. Temperature dependence of the electrical conductivity of granite and quartz-monzonite from south Bulgaria: geodynamic inferences. *J. Balkan Geophys. Soc.* 3(2), 13—19.