

УДК 550.361

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАГМАТИЧЕСКИХ ПОРОД РАЙОНА СТАНЦИИ АКАДЕМИК ВЕРНАДСКИЙ

С.И. Шепель, П.А. Буртний, Е.Е. Карнаухова.

Институт геофизики НАН Украины, 03142, Киев-142, Палладина 32, earth@igph.kiev.ua

Реферат. Исследован характер температурных зависимостей удельного электрического сопротивления, относительной диэлектрической проницаемости, энергии активации токоносителей кристаллических пород района антарктической станции Академик Вернадский. Измерения электрических параметров выполнялось на разных частотах электромагнитного поля в температурном поле до 900⁰С. Выявлено несколько интервалов с разными температурными градиентами электрических параметров, которые определяются типом породы и частотой электромагнитного поля. Установлено, что уменьшение размеров зерен минералов в диоритах обуславливает снижение энергии активации, электросопротивление и повышает диэлектрическую проницаемость.

Температурні зміни електричних властивостей магматичних порід району станції Академік Вернадський.
С.І.Шепель, П.А. Буртний, О.С. Карнаухова

Реферат. Вивчено характер температурних залежностей питомого електричного опору, відносної діелектричної проникності, енергії активації струмоносців кристалічних порід району Української антарктичної станції Академік Вернадський. Вимірювання електричних параметрів виконувалося на різних частотах електромагнітного поля в температурному полі до 900⁰С. Виявлено декілька інтервалів з різними температурними градієнтами електричних параметрів, які визначаються типом порід та частотою електромагнітного поля. Встановлено, що зменшення розмірів зерен мінералів в діоритах обумовлює пониження енергії активації, електроопір та підвищує діелектричну проникність.

Temperature dependences of the magmatic rocks electrical properties in the region of Akademik Vernadsky by S.I. Shepel, P.A. Burtny, E.E. Karnaukhova

Abstract. The character of the temperature dependences of the specific electrical resistance, relative dielectric constant, activation energy of the current carriers of crystal rocks collected in the area of the Antarctic station Akademik Vernadsky was investigated. Measurements of electrical parameters were carried out on the different frequencies of the electromagnetic field in the temperature field up to 900⁰С. Some intervals with different temperature gradients of electrical parameters are revealed, which are determined by a type of rocks and frequency of the electromagnetic field. It was revealed that the reduction of the grain sizes of diorites results in decreases of the activation energy, electroresistance and raises of the dielectric constant.

Key words: electric properties, rocks, temperature, Antarctica.

1. Введение

Петрофизические исследования в различных термобарических условиях, моделирующих глубинные обстановки земных недр, являются важной составной частью геофизических работ, направленных на изучение строения и состава земной коры и верхней мантии. Понимание природы и характера процессов, происходящих на больших глубинах в условиях высоких и сверхвысоких температур (Т) и давлений (Р), требует системного изучения комплекса физических, в том числе и электрических, параметров минерального вещества в соответствующих термобарических и флюидных обстановках. Создание глубинных петрофизических моделей, наиболее адекватно отражающих реальное состояние, возможно лишь с использованием материалов изучения упругих, электрических, магнитных, теплофизических и других параметров горных пород и минералов при высоких Т и Р. Совместный анализ полученных геоэлектрических моделей и материалов полевых электромагнитных исследований данного региона позволяет сузить неоднозначность в интерпретации природы аномалий электропроводности, оценить характер флюидного режима, создать нормальный геоэлектрический разрез. Среди набора глубинных факторов, оказывающих существенное влияние на состояние литосферы, температура является одним из

основных определяющих параметров. Диапазон изменения температуры от дневной поверхности до астеносферы составляет более 1100°C , а его глубинный градиент зависит от конкретной геологической ситуации. Электрические характеристики кристаллических пород, образующих земную кору и верхнюю мантию, являются весьма чувствительными даже к сравнительно незначительным колебаниям температуры, что определяет необходимость и актуальность температурных исследований комплекса электрических параметров (удельного электрического сопротивления ρ , относительной диэлектрической проницаемости ϵ , энергии активации токоносителей E_0 , предэкспоненциального коэффициента ρ_0 и др.) в широком интервале частот электромагнитного поля и при разных значениях флюидонасыщенности и минерализации поровых растворов.

2. Методика опытов и объекты исследований

Влияние высокой температуры до 900°C на электрические свойства сухих и воздушно-сухих пород изучалось на специализированной установке, состоящей из двух основных блоков: высокой температуры и измерительного (Лебедев и др., 1986). Блок высокой температуры включает в себя печь, термопару с милливольтметром, амперметр и трансформатор. Измерительный блок состоит из пульта управления, тераомметра, омметра, высокочастотного измерителя емкостей и индуктивностей и низкочастотного моста емкостей. Печь, позволяющая получить температуру до 1000°C , представляет собой кварцевую трубку, на которую была бифилярно намотана нихромовая проволока сопротивлением 13 Ом. Мощность печи при максимальном токе нагрузки составляет 640 Вт. Теплоизоляция осуществляется листовым асбестом, смешанным с шамотной глиной. Исследуемые образцы имеют форму дисков, диаметром 22 и высотой 4-5 мм. Рабочие грани исследуемых проб тщательно шлифовались. В качестве электродов использовалась напыленная в вакууме пленка из золота. Во время экспериментов измерялось электрическое сопротивление при постоянном и переменном токе частотой 1 кГц, которое в дальнейшем пересчитывалось в удельное электрическое сопротивление, а также емкость образцов пород на частотах 1 и 700 кГц, с которой затем вычислялась относительная диэлектрическая проницаемость на соответствующих частотах. Погрешности измерений ρ и ϵ составляют соответственно ± 2 и ± 3 %. Температурные зависимости удельного электрического сопротивления (в дальнейшем просто электрическое сопротивление) давали возможность рассчитать энергию активации токоносителей и предэкспоненциальный коэффициент. Исследовались сухие и воздушно-сухие образцы, влажность которых определялась термовесовым методом.

В температурном поле до 900°C изучены электрические параметры гранодиорита (о. Кинг), диоритов (г. Дюсберг, г. Демария), гранодиорита (о. Барцелот), диоритового порфирита (о-ва Барчанс), базальта (о. Галиндез), андезитовидного диоритового порфирита (о. Шелтерс), андезитового микродиорита (о. Галиндез). Гранодиорит о. Кинг относится к выделенным породам интрузивного комплекса (Лебедев и др., 2002; Буртный и др., 2003), обладает гипидиоморфнозернистой структурой и состоит из плагиоклаза (36,1 %), кварца (34,6), калиевого полевого шпата (15,7), биотита (10,7), амфибола (1,2), аксессуарных (1,2) и вторичных (0,7) минералов. Аксессуарные представлены апатитом, цирконом, рудными, вторичные – хлоритом, рудным, серицитом (по плагиоклазу). Диорит г. Дюсберг относится к интрузивному комплексу, характеризуется гипидиоморфнозернистой структурой и в его состав входит плагиоклаз (57,1 %), биотит (14,0), амфибол (12,0), кварц (5,8), пироксен (4,4), аксессуарные (3,2), вторичные минералы (2,6). Аксессуарные – рудный, апатит, вторичные – эпидот, хлорит, рудный, серицит, роговая обманка. Диорит г. Демария (интрузивный комплекс) обладает порфириновой структурой и в свой состав включает порфирировидные выделения плагиоклаза (58,0 %), амфибол (16,0), пироксен (7,1), биотит (3,8), кварц (2,2), а также вторичные (хлорит, эпидот, рудный, 6,7) и аксессуарные минералы (рудный, апатит, 6,2). К интрузивному комплексу относится также гранодиорит о-ва Барцелот с гипидиоморфнозернистой структурой, состоящий из плагиоклаза (65,4 %), кварца (21,6), биотита

(2,2), амфибола (2,0), калиевого полевого шпата (1,5), пироксена (0,5), вторичных (хлорит, эпидот, рудный, 4,2), аксессуарных (рудный, апатит, 2,6).

$\lg(\rho, \text{Ом}\cdot\text{м})$

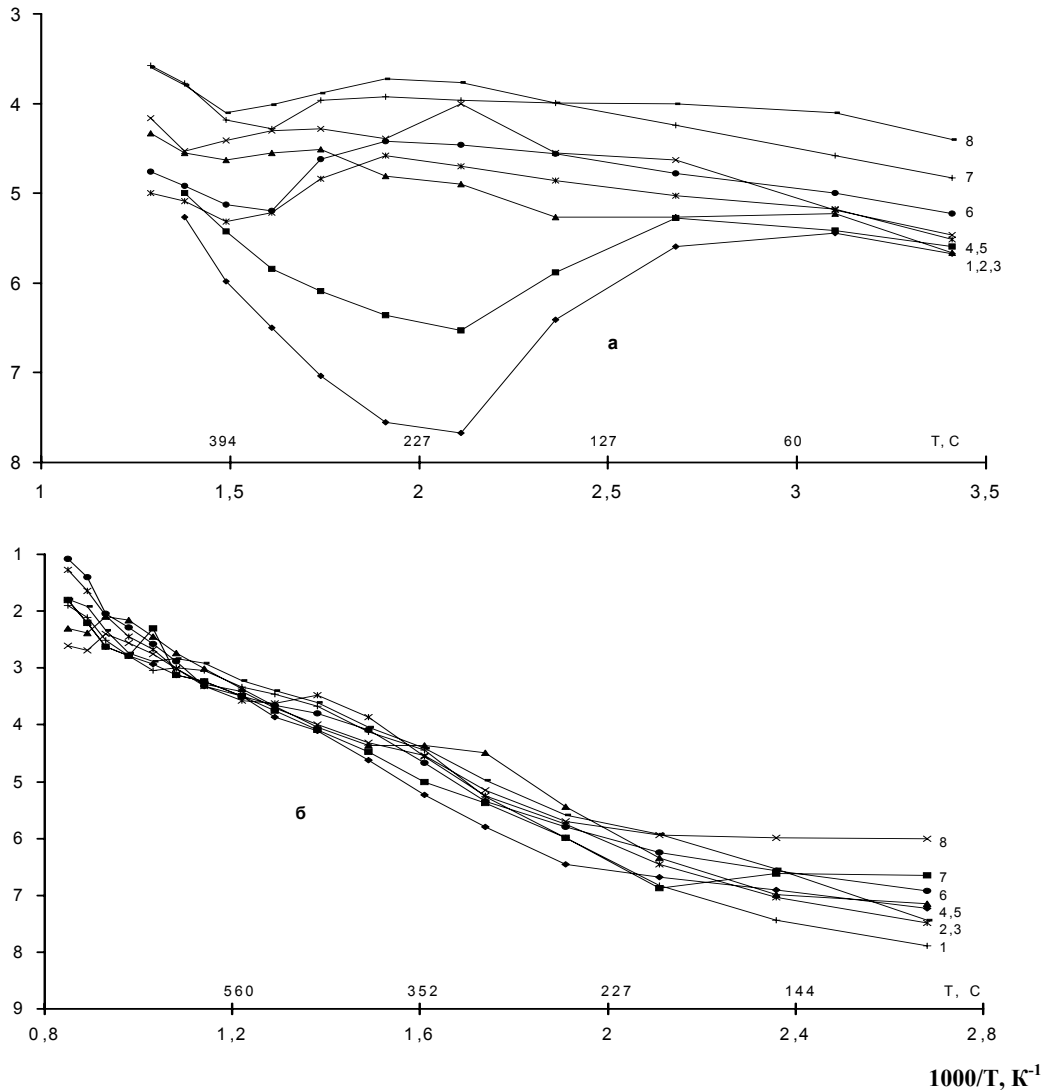


Рис.1. Температурные изменения электрического сопротивления пород Аргентинского архипелага и прилегающих территорий:

а – воздушно-сухие образцы: 2,3,5,7 - измерения на постоянном; 1,4,6,8 – на переменном токе.

1,3 – базальт (о. Галиндез); 2,4 – гранодиорит (о. Барселот); 5,6 – андезитовидный диоритовый порфирит (о. Шелтерс); 7,8 – диоритовый порфирит (о-ва Барчанс);

б – сухие образцы: 1,2,4,5 – измерения на постоянном; 3,6,7,8 – на переменном токе.

1,3 – диорит (г. Дюсберг); 2,6 – гранодиорит (о. Кинг); 4,7 – диорит (г. Демария); 5,8 – андезитовый микродиорит (о. Галиндез).

Исследованные жильные породы представлены базальтом, андезитовым микродиоритом, диоритовым порфиритом и андезитовидным диоритовым порфиритом. Они обладают порфировой структурой, основная масса которых представлена от слабораскристаллизованных разновидностей до полнокристаллических, характеризующихся

гиалопилитовой или пилотакситовой структурой. Основная масса базальта представлена лейстами плагиоклаза (91,9 %), промежутки между которыми выполнены агрегатом мелких округлых зерен кварца (0,6), вторичных (4,2) и акцессорных минералов (3,3). Андезитовый микродиорит включает в себя плагиоклаз (87,4%) и вкрапленники вторичных (9,4) и акцессорных минералов (3,2). Основная масса диоритового порфирита состоит из плагиоклаза (26,2%), кварца (3,7), роговой обманки (23,1), вторичных минералов (25,3) и акцессориев (5,0). Вкрапленники этого образца представлены плагиоклазом (10,4), кварцем (5,1), вторичными образованиями (1,7). Андезитовидный диоритовый порфирит состоит из плагиоклаза (90,1%), в промежутках между зернами которого выделяется полевой шпат (8,3) и акцессории (3,7).

3. Результаты исследований

Влияние высокой температуры на удельное электрическое сопротивление воздушно-сухих пород представлено на рис. 1а, а сухих — на рис. 1б. Наличие водной компоненты существенно изменяет характер $\rho(T)$ (Шепель, 2002). Отметим, что наиболее отчетливо аномалия в температурных зависимостях электрического сопротивления проявляется для образца гранодиорита, что фиксируется как на постоянном, так и на переменном токе. Аномальное повышение ρ составляет примерно 2,5 порядка для постоянного тока и 1,4 порядка для переменного. Это связано с относительно повышенным содержанием влаги в составе воздушно-сухого гранодиорита (0,39%) по сравнению с другими изученными породами, для которых оно колеблется в пределах 0,03-0,08 %. Температурные зависимости электросопротивления сухих образцов характеризуются тремя интервалами с различными градиентами и соответственно разными величинами энергий активации токоносителей, что иллюстрирует табл. 1.

Таблица 1. Электросопротивление и энергия активации пород при высоких температурах

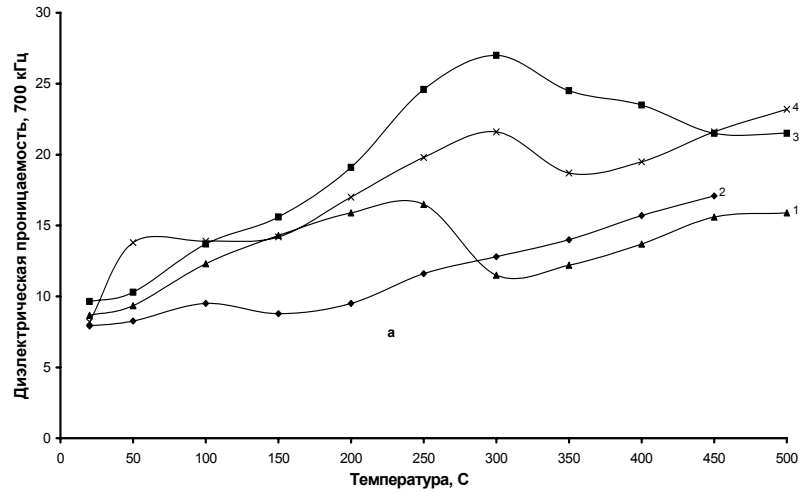
№ обр.	Место отбора	Порода	$\lg\rho_{200}$	E_{00} , эВ	E_{01} , эВ	E_{02} , эВ	$\lg\rho_{900}$
39	г. Дюсберг	Диорит	6,82	0,38 (100-200)	0,82 (200-500)	1,27 (700-900)	2,50
97	г. Демария	Диорит	6,68	0,20 (100-250)	0,84 (250-500)	1,26 (700-900)	1,85
72	о. Галиндез	Андезитовый микродиорит	6,34	0,28 (100-200)	0,65 (200-500)	0,87 (600-800)	2,31
297	о. Кинг	Гранодиорит	6,45	0,36 (100-200)	0,81 (200-450)	1,20 (700-800)	1,70

Примечания. В скобках указаны интервалы температур. $\lg\rho_{200}$, $\lg\rho_{900}$, — значения логарифма удельного электрического сопротивления (Ом·м) при температурах соответственно 200 и 900°С.

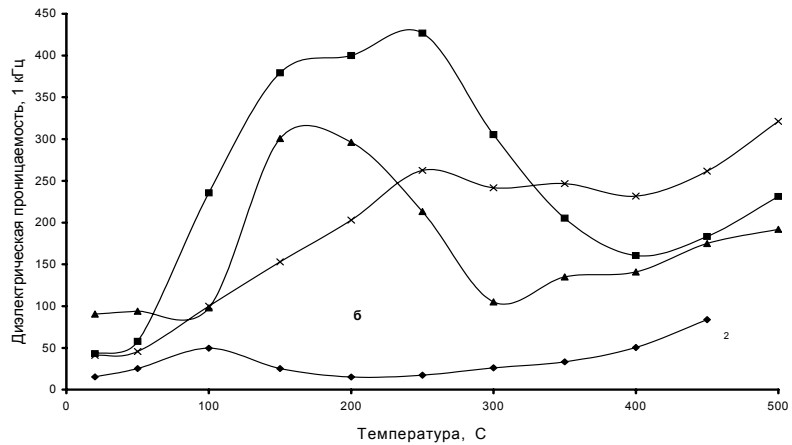
В низкотемпературной зоне (до 200-250°С) энергия активации составляет 0,20-0,38эВ, в области примесной проводимости – 0,65-,84 эВ и в интервале собственной возрастает до 0,87-1,27 эВ. Наиболее низкоомным с минимальными значениями энергий активации в интервале примесной и собственной электропроводности является андезитовый микродиорит, представляющий собой мелкозернистый диорит с величиной зерна менее 1 мм.

Снижение энергии активации и электросопротивления этой породы обусловлено ростом удельной поверхности зерен. На границе зерен кристаллическая решетка минералов нарушена, что вызывает уменьшение энергии связи поверхностных ионов в узлах решетки по сравнению с ионами, удаленными от границ. На границах зерен увеличивается также коэффициент

диффузии, предполагающий большую подвижность ионных токоносителей. Все это повышает электропроводность и снижает энергию активации мелкокристаллического андезитового микродиорита по сравнению с более крупнокристаллическими диоритами. Таким образом, уменьшение энергии активации токоносителей и увеличение электропроводности – это два явления, которыми сопровождается переход к более мелкозернистой структуре у пород аналогичного минерального и химического состава.



а)



б)

Рис.2. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости (а – 700 кГц, б – 1 кГц) воздушно-сухих пород: а: 1 – андезитовидный диоритовый порфирит (о. Шелтерс); 2 – гранодиорит (о. Кинг); 3 – базальт (о. Галиндез); 4 – диоритовый порфирит (о. Барчанс).

Температурные зависимости диэлектрической проницаемости (ϵ_1 и ϵ_7 , частоты 1 и 700 кГц) изученных пород представлены на рис. 2 для воздушно-сухих образцов и на рис. 3 для сухих проб. Сравнительный анализ этих зависимостей позволяет сделать вывод о существенном влиянии водной компоненты также и на характер температурных кривых ϵ . Сухие образцы описываются увеличением этого параметра с различными градиентами в определенных интервалах T . Воздушно-сухим пробам присущ принципиально иной характер

$\epsilon(T)$: наличие аномальных зон при температурах, превышающих 100-250^oC, что проявляется в уменьшении диэлектрической проницаемости при дальнейшем росте температуры. Отчетливые указанные аномальные зоны зафиксированы в более низкочастотной области, т.е. для диэлектрической проницаемости, измеренной на частоте 1 кГц, по сравнению с частотой 700 кГц. Следовательно, низкочастотная относительная диэлектрическая проницаемость является более чувствительным индикатором фазового состояния минерального вещества.

Таблица 2. Диэлектрическая проницаемость пород при высоких температурах

№ обр.	Место отбора	Порода	$\epsilon_{7(200)}$	$\epsilon_{7(800)}$	$\epsilon_{1(200)}$	$\epsilon_{7(800)}$
39	г. Дюсберг	Диорит	9,45	51,3	18,2	700,5
97	г. Демария	Диорит	11,1	34,8	19,3	424,6
72	о. Галиндез	Андезитовый микродиорит	8,55	66,9	21,9	1050
297	о. Кинг	Гранодиорит	5,81	56,9	12,6	448,6

Примечания. В скобках указаны температуры измерения диэлектрической проницаемости в ^oC.

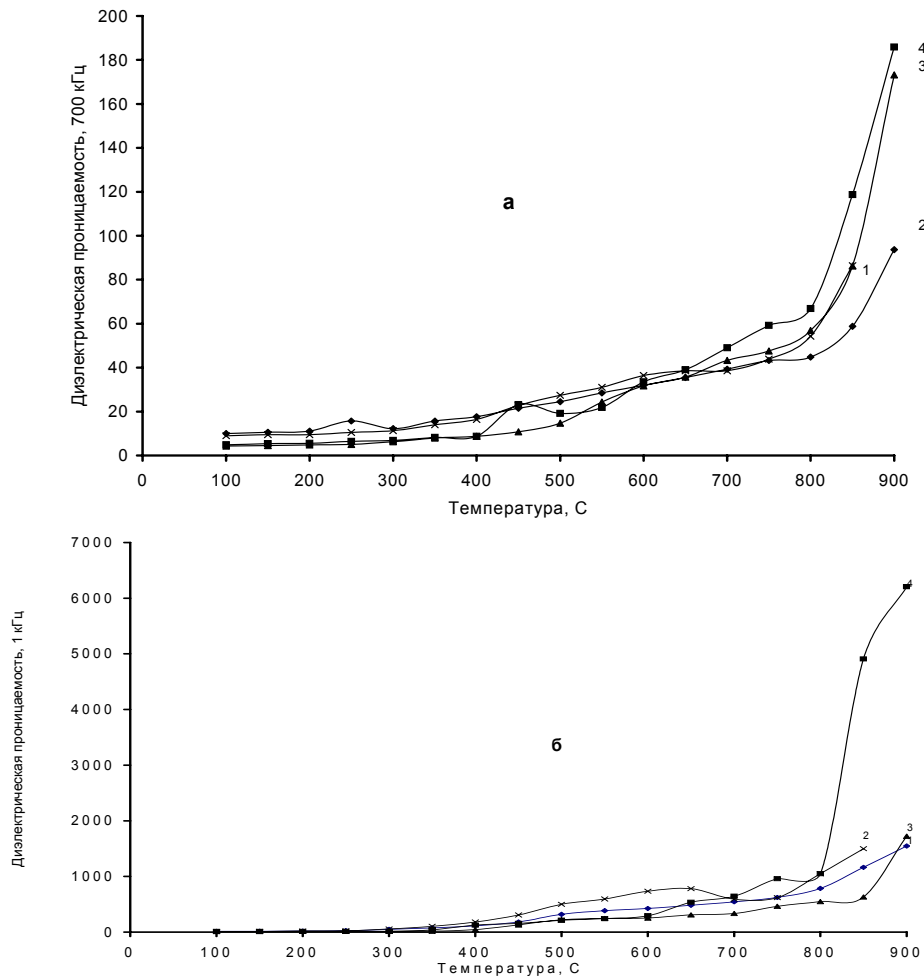


Рис. 3. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости (а – 700 кГц, б – 1 кГц) сухих пород: а: 1 – диорит (г. Дюсберг); 2 – диорит (г. Демария); 3 – гранодиорит (о. Кинг); 4 - андезитовый микродиорит (о. Галиндез).

С увеличением температуры более интенсивный рост испытывает ϵ_1 по сравнению с ϵ_7 . Температурные зависимости как низкочастотной, так и высокочастотной диэлектрической проницаемости характеризуются тремя интервалами с различными градиентами. В первом наиболее низкотемпературном диапазоне ϵ изученных пород возрастает на единицы и десятки процентов, во втором – в несколько раз и при наиболее высоких температурах от 700-800 до 900°С в несколько десятков раз. Значения относительной диэлектрической проницаемости при разных температурах и частотах для некоторых сухих пород Аргентинского архипелага и прилегающих территорий приведены в табл. 2. Как видно из табл. 2 и рис. 3 максимальным ростом ϵ в температурном поле до 900°С характеризуется образец андезитового микродиорита, который обладает микрозернистой структурой по сравнению с диоритами, что нашло свое отражение также и в особенностях температурных изменений удельного электрического сопротивления.

4. Заключение

В результате выполненных исследований изучены особенности и закономерности температурных изменений удельного электрического сопротивления, энергии активации токоносителей и относительной диэлектрической проницаемости ряда образцов магматических горных пород, отобранных в районе станции Академик Вернадский на островах Аргентинского архипелага и прилегающих территориях западного побережья Антарктического полуострова. Измерения электрических свойств этих минеральных образований выполнялись на разных частотах электромагнитного поля в интервале от комнатных температур до 900°С. Установлено существенное влияние структурных особенностей строения изученных диоритов на их электрические характеристики. Уменьшение размеров зерен породообразующих минералов вызывает снижение энергии активации токоносителей, электрического сопротивления и повышение диэлектрической проницаемости, что особенно заметно проявляется при измерениях на сравнительно низких частотах и в более высокотемпературной зоне. Наличие флюидной компоненты в составе пород обуславливает формирование аномалий в характере температурных кривых как электросопротивления, так и диэлектрической проницаемости. Последний параметр является более чувствительным индикатором фазового состояния породы в сравнительно низкочастотной области измерений.

Литература

Лебедев Т.С., Корчин В.А., Савенко Б.Я. и др. Физические свойства минерального вещества в термобарических условиях литосферы. - К.: Наукова думка, 1986. - 200 с.

Лебедев Т.С., Шепель С.И., Корчин В.А. и др. Петрофизические характеристики горных пород западного побережья Антарктического полуострова и прилегающих островов в районе станции Академик Вернадский // Геофизический журнал. - 2002. - Т.24, №6. - С. 93-115.

Буртный П.А., Карнаухова Е.Е., Корчин В.А. и др. Физические характеристики магматических пород района антарктической станции Академик Вернадский // Укр. антарк. журн. - 2003. - №1. - С.47-53.

Шепель С.И. Электрические свойства магматических пород района станции Академик Вернадский // Бюл. Укр. антарк. центр. - 2002. - Вып.4. - С. 76-82.