

Issue N<sup>o</sup> 19.sz.füzet

ÁLTALÁNOS FÖLDTANI SZEMLE

a Magyarhoni Földtani Társulat  
Általános Földtani Szakosztályának időszakos kiadványa

Szerkeszti

a Szakosztály vezetőségének közreműködésével

K L E B B É L A

K É Z I R A T

Budapest, 1983.

---

GENERAL GEOLOGICAL REVIEW

Issued occasionally  
by the Section for General Geology of the Hungarian  
Geological Society

M A N U S C R I P T

Budapest, 1983.

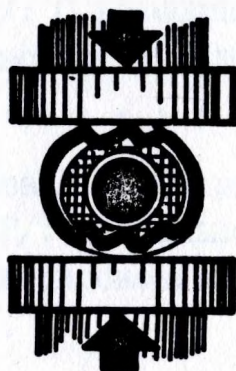
Hungary

---

/A közlemények tartalmáért egyedül a szerzők felelősek./  
/The authors are solely responsible for the contents of their papers/

"Новые методы, аппаратуры и результаты экспериментальных исследований физических и структурных свойств минералов и горных пород при высоких термобарических режимах"

Тезисы докладов  
Тематического Симпозиума и Рабочего  
Совещания Проекта 3 КАПГ  
/г.Мишколец, 24-29 октября 1983 г./  
БНР



"Az ásványok és kőzetek fizikai és szerkezeti tulajdonságai nagy nyomáson és magas hőmérsékleten. Új módszerek, műszerek és kísérleti eredmények".

A KAPG. 3. projekt tematikus szimpóziumának és munkakülésének előadás-kivonatai

/Miškolec, 1983. október 24-29/

Örkesztette:  
Eggerer Brigyes



## Содержание

стр.

- Волярович М.П., Ефимова Г.А., Баласанян В.С. /СССР/:  
Скорости упругих волн при высоких давлениях в гранитоидах Армении разного возраста и генезиса . . . . . 3
- Волярович М.П., Ефимова Г.А. Фольштадт Х., Мюллер Х. /СССР/: Анизотропия скорости продольных и поперечных волн у микроклина до 20 кбар. . . . . 7
- Пархоменко Э.И. /СССР/: О возможной природе зон повышенной электропроводности в литосфере по лабораторным данным. . . . . 11
- Волярович М.П., Ефимова Г.А., Киреенкова С.М., Сафаров И.Б. /СССР/: Аномальное поведение упругих характеристик клинопироксенов под действием высокого давления. . . . . 15
- Калинин Б.А., Томашевская И.С., Родкин М.В. /СССР/:  
О связи реологических свойств твердых тел при фазовых переходах с геодинамическими процессами . . . 19
- Пархоменко Э.И. /СССР/: Характер корреляционной зависимости между электрическими параметрами минерального вещества в широком интервале температур. . 22
- Мюллер Х.И. /ГДР/: Исследования упругих свойств гранулитов при высоких давлениях и температурах . . 25
- Крафт А. /ГДР/: Отношение между структурой и свойствами минералов и кристаллических веществ при высоких давлениях и температурах. . . . . 27
- Франк С., Штиллер Х. /ГДР/: О динамике и энергетике в ядре Земли. . . . . 29



- Бажок Е.И., Юрель Г.Н., Разникова А.П., Мансуров В.А. /СССР/: О механизме остаточной деформации мрамора при сложном напряженном состоянии. . . . . 31
- Мамедов А.Л., Пархоменко Э.И. /СССР/: Определение давления в камере типа поршень-цилиндр при высоких температурах. . . . . 35
- Пралат А. /ПНР/: Схема для измерения электрического сопротивления образцов породы. . . . . 39
- Бакиев М. /СССР/: Физические свойства горных пород из различных сейсмоактивных регионов Узбекистана при высоких термобарических условиях. . . . . 43
- Челидзе Т.Л., Геладзе Г.Г. /СССР/: О комбинировании кондуктометрии и ДТА при высокотемпературных исследованиях горных пород. . . . . 49
- Зелинка Т., Гейда П. /ЧССР/: Вибрационный магнитометрический метод измерения характеристик намагничивания горных пород. . . . . 51
- Чанишвили З.В., Кропачек В., Лаштовичкова М. /СССР/: Корреляция тепловых и электрических свойств базальтовых горных пород с их составом. . . . . 55
- Дмитриев А.П., Новик Г.Я., Зильбершмидт М.Г. /СССР/: Новые методы и результаты исследования механизма поведения горных пород при высоких термодинамических параметрах. . . . . 57
- Заворыкина Т.К., Зильбершмидт М.Г., Ряполов А.Н. /СССР/: О механизме изменения свойств железистых кварцитов при действии высоких динамических нагрузок. . . . . 61



- Балакишиев Ш.А., Исаева М.И., Гасанов А.Б. /СССР/:  
Оценка влияния вторичных изменений на физические характеристики ультрабазитов при высоких р, Т-условиях. . . . . 65
- Швец И., Фойтек А. /ЧССР/: Измерение теплового коэффициента линейного расширения горных пород и его использование в инженерной геофизике . . . 69
- Эгерер Ф. /ВНР/: Некоторые минералогические и петрографические проблемы электропроводимости между зёрнами горных пород . . . . . 71
- Лебедев Т.С., Шаповал В.И., Савенко Б.Я., Корчин В.А., Шепель С.И., Василяка В.Т., Правдивый А.А. /СССР/:  
Некоторые аппаратурно-методические разработки в связи с термобарическими исследованиями физических свойств минерального вещества . . . . . 75
- Лебедев Т.С., Шаповал В.И., Правдивый А.А. /СССР/:  
Термобарические исследования тепловых свойств некоторых пород. . . . . 85
- Лебедев Т.С., Корчин В.А., Буртный П.А. /СССР/:  
Модель упругого состояния минерального вещества литосферы по данным лабораторных рт-опытов . . . 89
- Лебедев Т.С., Савенко Б.Я. /СССР/: Остаточная намагниченность минерального вещества в глубинных зонах земной коры. . . . . 93
- Морозов В.Н. /СССР/: Макрополярная теория деформации горных пород. Высокотемпературная релаксация напряжений. . . . . 97

Лебедев Т.С., Шепель С.И. /СССР/: Электрические  
 характеристики гранитоидов в различных  
 PT- условиях . . . . . 103

Такач И. /ВНР/: Кристаллические фазы андезитовых  
 стекол при высоких PT-условиях в воде. . . . . 69

Pesty L. /Ungarn/:  
 Experimentalpetrographische Modelluntersuchung der  
 Palagonitbildung . . . . . 69

Gálos, M. - Kertész P. /Ungarn/:  
 Thermodynamische Grundlagen der Pelsmechanik  
 in der Bestimmung der Stoffkonstanten . . . . . 107

/A közetmechanika termodinamikai alapjai az  
 anyagjellemzők meghatározásában/ . . . . . 109

Josef Bochnicek /Tschechoslowakei/  
 Der Einfluss der geometrischen Form und des  
 Erkal tungsregimes auf den Verlauf der Magnetisa-  
 tion innerhalb einiger geologischer Gebilde . . . 111



# СКОРОСТИ УПРУГИХ ВОЛН ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ В ГРАНИТОИДАХ АРМЕНИИ РАЗНОГО ВОЗРАСТА И ГЕНЕЗИСА.

М.П. Ноларович, Г.А. Ефимова, В.С. Баласанян.

Институт физики Земли АН СССР.

В геологическом строении Армении существенную роль играют породы гранитоидного комплекса [1]. Анализ экспериментальных исследований показал, что породы разновозрастных гранитоидных комплексов хорошо дифференцируются по скоростям упругих волн  $V_p$  [2]. Это объясняется тем, что каждый комплекс характеризуется своими индивидуальными особенностями минерального состава, структуры, текстуры и условий формирования, являющихся основными факторами, влияющими на физические свойства пород. Как видно из рис. 1, области расположения кривых для разновозрастных гранитоидов различны. Наибольший разброс  $V_p$  (5,0–7,2 км/с при 15 кбар) у гранитоидов палеозойского комплекса, что связано с процессами метаморфизма. Довольно широкая область 5,64–7,32 км/с при 15 кбар) для третичных гранитоидов магматического происхождения, отличающихся большим разнообразием петрографического состава. Для них характерно присутствие трех цветных минералов – пироксена, роговой обманки и биотита, определяющих большое различие  $V_p$ . Значения  $V_p$  для нижнемеловых и среднеюрских гранитоидов располагаются в узком диапазоне, что обусловлено их однообразным петрографическим составом. Установлена корреляционная связь между скоростями  $V_p$  и содержанием цветных минералов в гранитоидных породах (рис. 2). Как видно, увеличение содержания темноцветных минералов выше 10% приводит к резкому возрастанию значений  $V_p$ . Основная роль цветных минералов для скоростей  $V_p$  доказывается следующими факторами: 1) гранитоиды, почти одинаковые по содержанию цветных минералов, но различные по количеству других главных породообразующих минералов, показывают близкие значения  $V_p$  (нижнемеловой комплекс); 2) для гибридных гранитоидов характерны высокие значения  $V_p$ , а для жильных и постмагматических измененных пород – низкие значения  $V_p$  в прямой связи с содержанием в них цветных минералов. В некоторых гранитоидах высокие скорости обусловлены ориентировкой темноцветных минералов [3]



В целом, гранитоиды Армении показывают довольно высокие значения  $V_p$ , не характерные для пород кислого состава, что объясняется повышенным содержанием в них темноцветных минералов.

#### Литература.

1. А.Т. Асланян Региональная геология Армении. Ереван.Издат. "Айпетрат". 1958.
2. М.П. Воларович, Г.А. Ефимова, А.Т. Вегуни, В.С. Баласанян. Исследование скорости и плотности некоторых гранитоидов Армении при высоких давлениях. Изв. АН Арм.ССР, серия науки о Земле, т. XXXIV, №4, 1981.
3. В.С. Баласанян, Г.А. Ефимова. Влияние ориентировки цветных минералов на скорости упругих волн в гранитоидах Армении. В сб. "Процессы и свойства вещества Земли", М., "Наука", 1981.

#### Подписи к рисункам.

Рис. 1. Области расположения кривых  $V_p = f(p)$ , взятых с температурной поправкой, для разновозрастных гранитоидов: 1-1 - палеозойские; 2-2 - среднеюрские; 3-3 - нижнемеловые; 4-4 - третичные.

Рис. 2. Корреляционная связь между значениями скоростей  $V_p$  и процентным содержанием темноцветных минералов в гранитоидах Армении при давлении 15 кбар.

#### VELOCITIES OF ELASTIC WAVES AT HIGH PRESSURES FOR ARMENIAN GRANITOIDS OF DIFFERENT AGE AND GENESICE.

M.P. Volarovich, G.A. Efimova, V.S. Balacanyan

Institute of physics of EARTH AN USSR



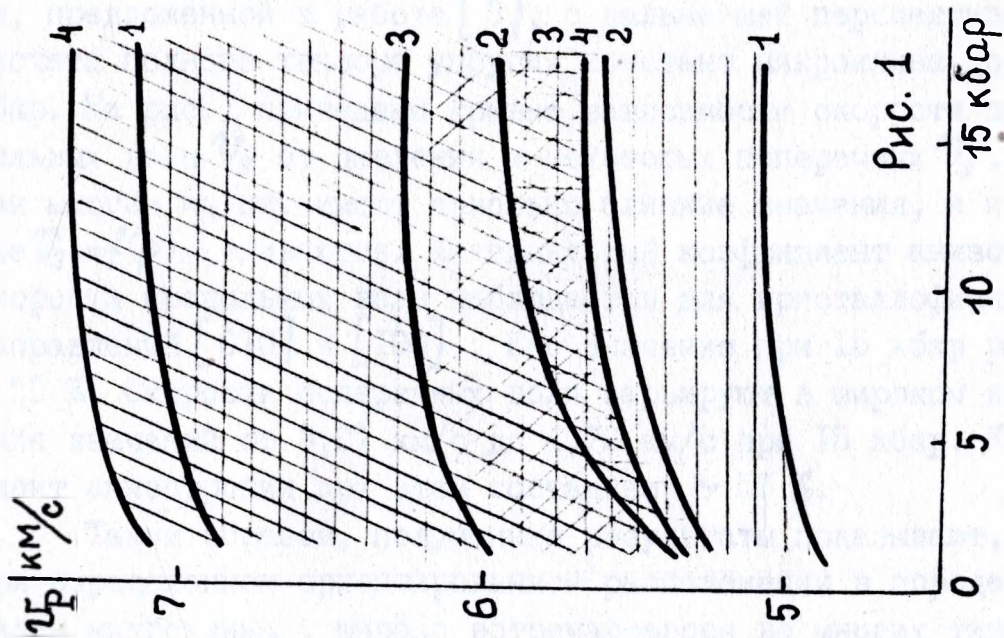


Рис. 1

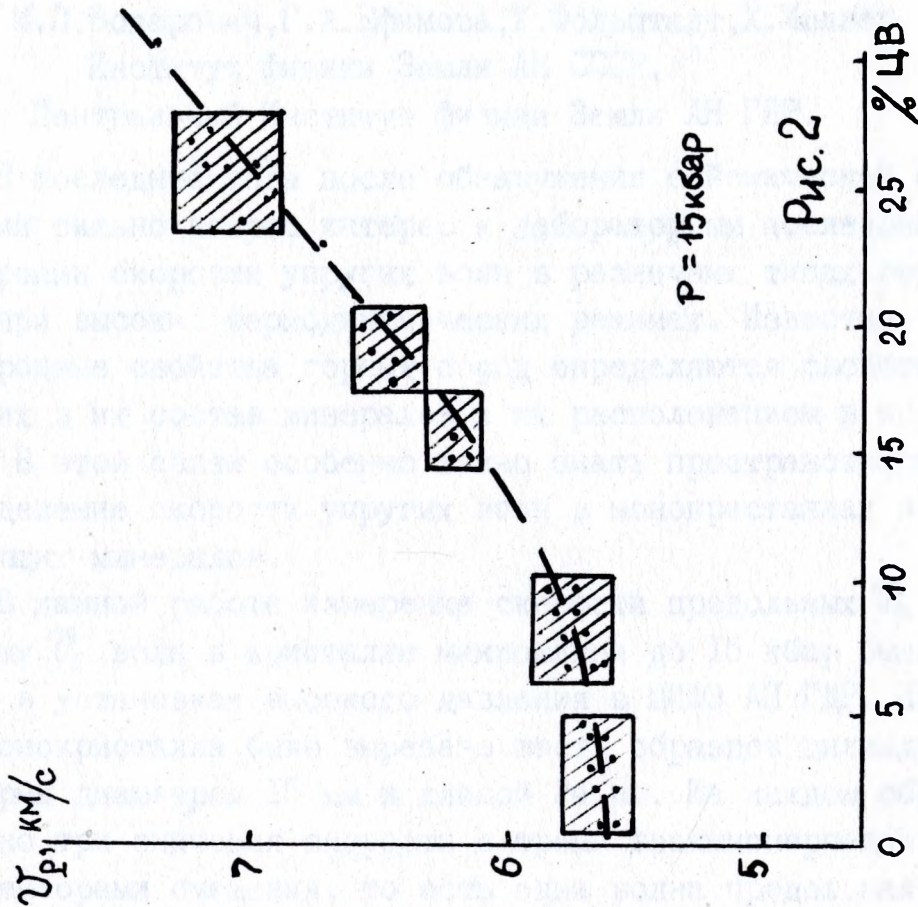


Рис. 2



## АНИЗОТРОПИЯ СКОРОСТИ ПРОДОЛЬНЫХ И ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН У МИКРОКЛИНА ДО 20 КБАР.

М.П.Воларович, Г.А.Ефимова, Х.Фольштадт, Х.Мюллер  
Институт физики Земли АН СССР,  
Центральный Институт физики Земли АН ГДР.

В последние годы после обнаружения сейсмической анизотропии сильно возрос интерес к лабораторным исследованиям анизотропии скорости упругих волн в различных типах горных пород при высоких термодинамических режимах. Известно, что анизотропные свойства горных пород определяются свойствами входящих в их состав минералов и их расположением в породе [1,2]. В этой связи особенно важно знать пространственное распределение скорости упругих волн в монокристаллах породообразующих минералов.

В данной работе измерение скорости продольных  $v_p$  и поперечных  $v_s$  волн в кристалле микроклина до 15 кбар было проведено в установках высокого давления в ЦИФЗ АН ГДР. Из одного монокристалла было вырезано шесть образцов цилиндрической формы диаметром 15 мм и длиной 24 мм. На каждом образце получено три значения скорости с тремя взаимноперпендикулярными векторами смещения, то есть одна волна продольная и две поперечные. Направления измерений выбирались строго по схеме, предложенной в работе [3], с дальнейшей перспективой расчета полного тензора упругих констант микроклина до 15 кбар. На рис.1 приведены кривые зависимости скорости продольных волн  $v_p$  от давления и некоторых поперечных  $v_s$ , так как многие из них имеют довольно близкие значения, и их кривые  $v_s = f(p)$  сливаются. Максимальный коэффициент анизотропии скорости продольных волн наблюдается для кристаллофизических направлений [010] и [100]. Его значение при 15 кбар равно ~ 50 %. Скорости поперечных волн варьируют в широком интервале значений от 3,07 км/с до 4,70 км/с при 15 кбар. Коэффициент анизотропии при этом составляет ~ 53 %.

Таким образом, полученные результаты показывают, что при определенном ориентированном расположении в породе кристаллы микроклина, широко встречающегося во многих типах горных пород, могут оказывать существенное влияние на анизо-



тропные свойства самих пород. Кроме того, в порфировидных структурах могут быть крупные вкрапленники анизотропных минералов, определяющих анизотропию скорости упругих волн вмещающей породы, как это было обнаружено в гранитоидах Армении [ 4 ].

1. М.П.Воларович, Е.И.Баюк, Г.А.Ефимова "Упругие свойства минералов при высоких давлениях", М., Наука, 1975.
2. Е.И.Баюк, М.П.Воларович, Ф.М.Левитова "Упругая анизотропия горных пород при высоких давлениях", М., Наука, 1982.
3. Б.П.Беликов, К.С.Александров, Т.В.Рыжова "Упругие свойства породообразующих минералов и горных пород", М., Наука, 1970.
4. М.П.Воларович, А.Т.Вегуни, Г.А.Ефимова, В.С.Баласанян. Исследование скорости и плотности некоторых гранитоидов Армении при высоких давлениях. Изв.АН Арм.ССР, серия науки о Земле, т. XXXIV, № 4, 1981.

ANIZOTROPY OF LONGITUDIAL AND SHEAR WAVE'S VELOCITIES  
FOR MICROCLYNE TO 20 KILOBARS.

M.P.Volarovich, G.A.Efimova

Institute of physics of Earth AN USSR

H.Vollstädt, H.-I.Muller

Central Institute of physics of Earth AN DDR

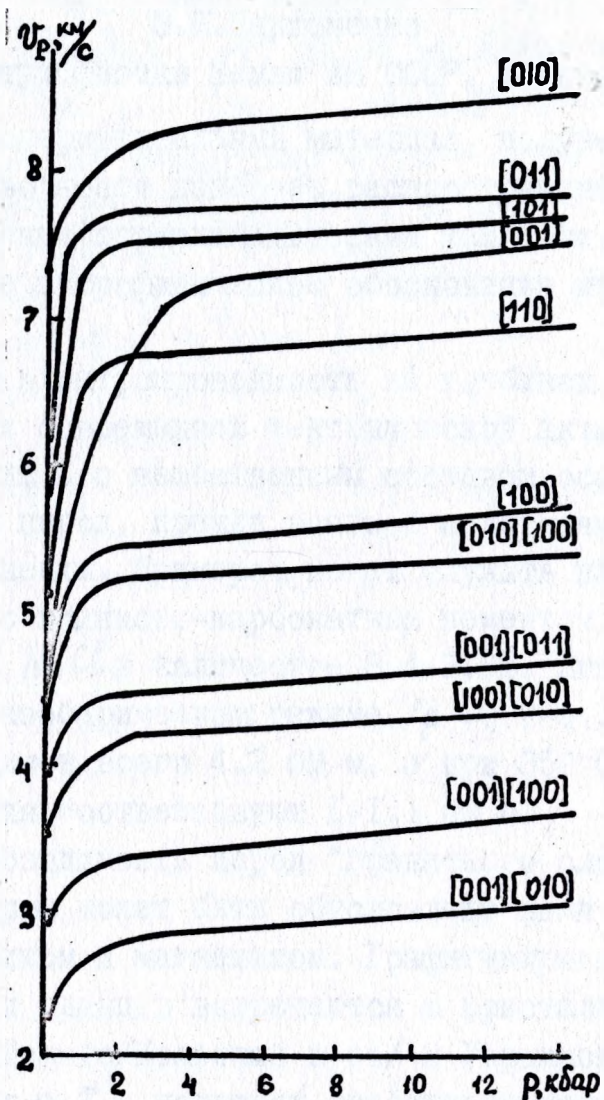


Рис. I. Зависимость скорости продольных  $v_p$  и поперечных  $v_s$  волн от давления в микроклине в различных кристаллофизических направлениях (в скобках показано направление распространения волны, второе направление соответствует направлению поляризации волны).



# О ВОЗМОЖНОЙ ПРИРОДЕ ЗОН ПОВЫШЕННОЙ ЭЛЕКТРО- ПРОВОДНОСТИ В ЛИТОСФЕРЕ ПО ЛАБОРАТОРНЫМ ДАННЫМ

Э.И. Пархоменко

Институт физики Земли АН СССР, Москва

Большой экспериментальный материал, полученный автором по электропроводности наиболее распространенных типов пород при различных термодинамических условиях, позволяет дать следующее петрофизическое обоснование проводящих зон в литосфере.

Повышенную электропроводность на глубинах 5–15 км /200–400°С/ в зонах современной тектонической активности следует связывать лишь с вещественным составом осадочного комплекса горных пород, прежде всего с содержанием в них низкоомные компоненты. Примером может служить плотный кварцевый песчаник с глинисто-карбонатным цементом, насыщенный раствором г/л  $NaCl$  в количестве 3.4–3.6%. Его электросопротивление  $\rho$  в изобарическом режиме / $p = 0.2–0.5$  ГПа/ при 160°С составляет всего 4.2 Ом м, а при 350°С экстраполированные значения соответствуют 1–1.1 Ом м.

Высокая проводимость пород "гранитного слоя" в условиях щита и платформы может быть обусловлена наличием графита, графита с пиритом и магнетитом. Графитизированные породы в виде гнейсов и сланцев встречаются в кристаллическом фундаменте Балтийского/Кольский п-ов/ и Украинского щитов.

При высоких  $p, T$  – условиях графитизированные гнейсы с преобладающим содержанием высокоомных минералов и малым содержанием графита с пиритом /около 5–7%/ в интервале температур 200–500°С имеют электросопротивление порядка 10–40 Ом м/рис.1/. Наличие в породах 10–15% графита понижает их сопротивление до десятых долей процента. Кинетика процесса деграфитизации при высоких  $p, T$  – условиях указывает на относительно низкие значения геотермы /300–400°С/, ограничивающих глубину залегания графитизированных пород.

К породам, содержащим магнетит и обнаруживающим самое низкое сопротивление, относятся серпентиниты и серпентинизированные перидотиты, характеризующиеся выделением магнетита или титаномагнетита по границам зерен или секущим их



трещинам. Низкое их сопротивление /4–15 Ом м/ при повышении температуры до 800°C практически не изменяется /рис.1/. Малое  $\rho$  обнаруживают еще щелочные пироксениты, содержащие титано-авгит и титаномagnetит до 25%, но они не получили достаточного распространения.

Особого внимания в аспекте природы высокопроводящих слоев в земной коре заслуживают результаты исследования железосодержащих карбонатов и пород, в состав которых они входят.

При исследовании изоморфного ряда сидерит-магнетит, а также лиственитов, содержащих брейнерит /Mg, Fe/CO<sub>3</sub>, установлено, что диссоциация железистых карбонатов, независимо от фугативности кислорода, сопровождается уменьшением сопротивления на два-пять порядков в узком интервале температур /рис.2/. Такое уменьшение в условиях квазигидростатического давления /0.2–2.0 ГПа/ отмечается даже при частичной их диссоциации. При этом продукты реакции независимо от ее развития отличаются стабильностью приобретенного сопротивления и малой величиной энергии активации 0.1эВ. Величина последней и наличие в продуктах распада Fe<sup>2+</sup> и Fe<sup>3+</sup> указывает на механизм электропроводности по схеме: Fe<sup>2+</sup> - e = Fe<sup>3+</sup>. Данный механизм превалирует и у измененных разностей ультраосновных пород второй стадии метаморфизма.

Достаточно широкая распространенность карбонатных пород, а также карбонатизированных сланцев, гнейсов и амфиболитов обогащенных окислами железа, позволяет предположить в средней части земной коры за их счет образование высокопроводящих зон, сочетающихся с магнитной аномалией.

Таким образом, наиболее вероятными породами некоторых проводящих зон в зависимости от глубины и термобарических условий могут быть плотные песчаники с железистым цементом /150–350°C/, графитсодержащие образования - гнейсы, сланцы скарны /100–400°C/, серпентинизированный комплекс ультраосновных пород /до 600–700°C/ и породы, содержащие частично диссоциированные железистые карбонаты или их продукты реакции /400–800°C/. Низкоомные породы встречаются также среди амфиболитов, диабазов, туфов и базальтов, но их сопротивление в лучшем случае на один-два порядка больше, чем указанных выше.



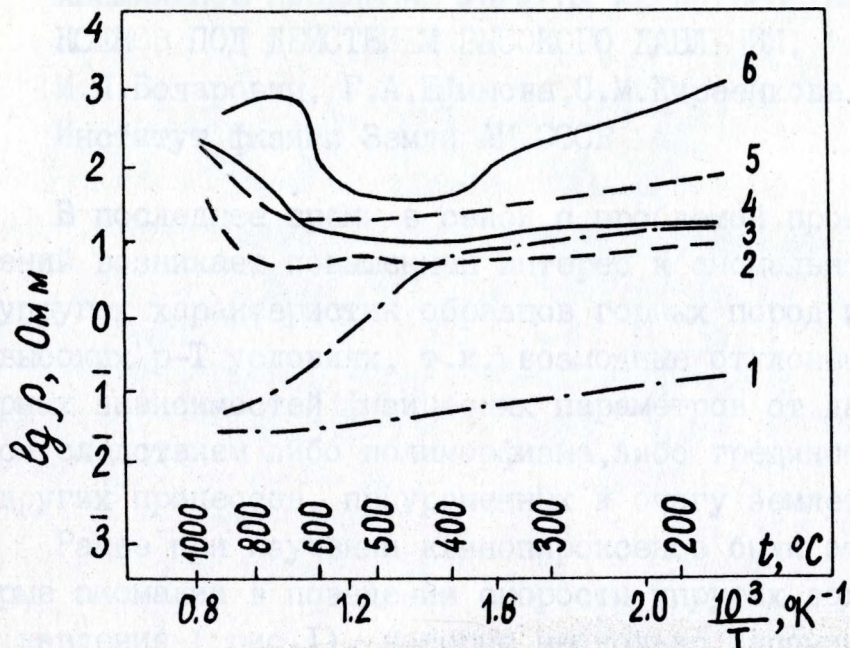


Рис. 1. Зависимость электросопротивления пород от температуры. 1, 3 - титано-авгитовые пироксениты; 2, 5 - серпентинизированные перидотиты, 4, 6 - графито-биотитовые гнейсы

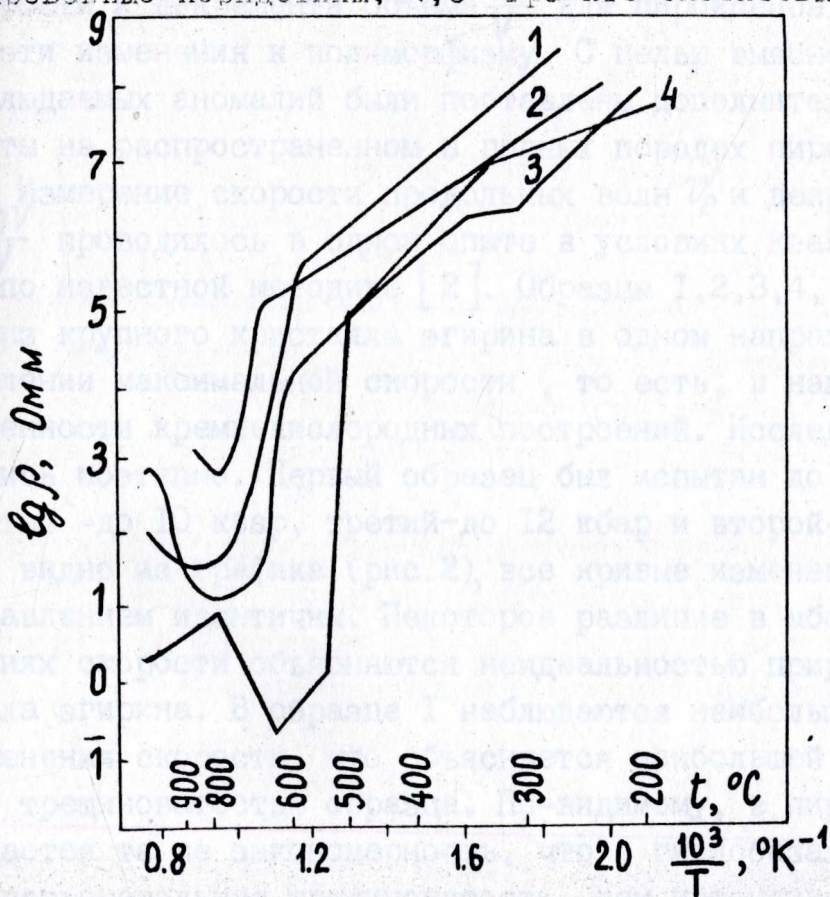


Рис. 2. Аномальный характер уменьшения  $\rho$  с повышением температуры при декристаллизации. 1, 2, 3 - листвеллиты, 4 - сидерит



## АНОМАЛЬНОЕ ПОВЕДЕНИЕ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК КЛИНОПИРОКСЕНОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ.

М.П.Воларович, Г.А.Ефимова, С.М.Киреенкова, И.Б.Сафаров  
Институт физики Земли АН СССР

В последнее время в связи с проблемой прогноза землетрясений возникает повышенный интерес к аномальному поведению упругих характеристик образцов горных пород и минералов при высоких  $p$ - $T$  условиях, т.к. возможные отклонения от закономерных зависимостей физических параметров от давления являются следствием либо полиморфизма, либо трещинообразования или других процессов, приуроченных к очагу землетрясений.

Ранее при изучении клинопироксенов были отмечены некоторые аномалии в поведении скорости упругих волн с повышением давления (рис.1), которые несколько напоминают ход кривых  $v_p = f(p)$  для известняков, испытывающих полиморфные превращения под давлением [1]. Однако, сопоставляя кривые скорости и декремента объема  $\frac{\Delta V}{V}$  для пироксенов, нельзя отнести эти изменения к полиморфизму. С целью выяснения природы наблюдаемых аномалий были поставлены дополнительные эксперименты на распространенном в горных породах пироксене-эгирине. Измерение скорости продольных волн  $v_p$  и декремента объема  $\frac{\Delta V}{V}$  проводилось в одном опыте в условиях квазигидростатики по известной методике [2]. Образцы 1,2,3,4, были вырезаны из крупного кристалла эгирина в одном направлении, в направлении максимальной скорости, то есть, в направлении протяженности кремнекислородных построений. Исследования проводились поэтапно. Первый образец был испытан до 5 кбар, четвертый - до 10 кбар, третий - до 12 кбар и второй - до 15 кбар. Как видно из графика (рис.2), все кривые изменения скорости с давлением идентичны. Некоторое различие в абсолютных значениях скорости объясняется неидеальностью природного кристалла эгирина. В образце 1 наблюдаются наибольшие аномальные изменения скорости, что объясняется наибольшей первоначальной трещиноватостью образца. По-видимому, в пироксенах соблюдается та же закономерность, что и в гялобазальтах - чем выше первоначальная трещиноватость, тем интенсивнее прогиб на кривой  $v_p = f(p)$  [3]. Образцы 5 и 6 изготовлены из других природных кристаллов, но в том же направлении.



Сопоставляя кривые изменения скорости с кривыми изменения объема образцов, мы предполагаем, что после интенсивного роста скорости в начальной области давлений до 0,5 кбар на следующем этапе повышения давления до 5 кбар в результате большой анизотропии физических свойств пироксенов происходит перенапряжение в отдельных точках образца и образец частично разрушается, причем положение усугубляют квазигидростатические условия опыта. При дальнейшем повышении давления происходит уплотнение разрушенных зон, скорость растет в общем случае, хотя декремент объема либо несколько уменьшается, либо остается постоянным. При снятии нагрузки разрушенные зоны должны проявиться. При этом зоны трещиноватости могут быть очень маленькими в диаметре и находиться внутри образца, не проявляя внешних эффектов трещинообразования. Исследования шлифов, сделанные А.Я.Салтыковским, до и после эксперимента с каждого образца подтвердили наше предположение.

Существующая первоначальная хаотичная трещиноватость действительно, исчезает под действием давления в интервале от 0,5 до 2 кбар в зависимости от степени разуплотнения образца, и после снятия нагрузки наблюдается только ориентированная определенным образом система трещин с некоторой концентрацией в отдельных точках. Обобщая экспериментальные данные по пироксенитам и эклогитам (рис.3), мы обнаружили [4], что образцы, содержащие пироксены даже порядка 20-30%, ведут себя аналогичным образом, только аномалии в скорости и декременте объема менее ярко выражены. Надо отметить, что подобные образцы пироксенитов испытывались в чистой гидростатике, однако, аномальные эффекты там не замечены. В данном случае, важную роль играют квазигидростатические условия опыта, так же как и при полиморфных переходах в известняках, при которых, чем больше неравномерность распределения давления в образце, тем интенсивнее проявляется полиморфизм.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что в экспериментах следует более внимательно относиться к различным аномальным явлениям, т.к. они могут играть существенную роль в интерпретации многих геофизических процессов.



Литература.

1. М.П.Воларович, Е.И.Баюк, Г.А.Ефимова. Упругие свойства минералов при высоких давлениях". М., Наука, 1975
2. С.М.Кирееенкова, И.Б.Сафаров. Одновременное определение скоростей продольных и поперечных волн в горных породах при высоких давлениях. Изв. АН СССР сер. Физика Земли, №12, 1979, с. 94-97.
3. М.П.Воларович, Ю.С.Генштафт, Г.А.Ефимова, Е.В.Наумова, А.Я.Салтыковский. Зависимость упругих характеристик щелочных базальтов субвулканической фации при высоких давлениях от степени их раскristализации. Изд. Техн. Унив. Тяж. Пром., Мишкольц, ВНР, серия А, т. 36, 1981.
4. М.П.Воларович, С.М.Кирееенкова, Е.И.Баюк. Исследование скоростей продольных волн и плотности эклогитов при давлениях до 17 кбар, Изв. АН СССР, сер. геол. №7, 1971.

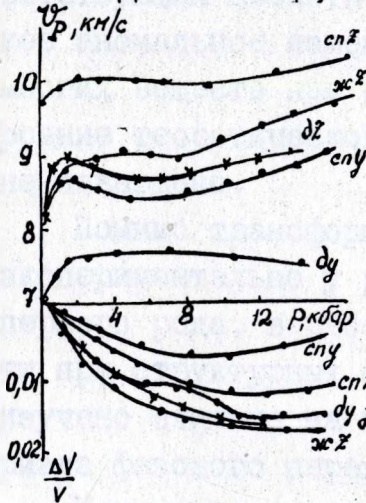


Рис. 1

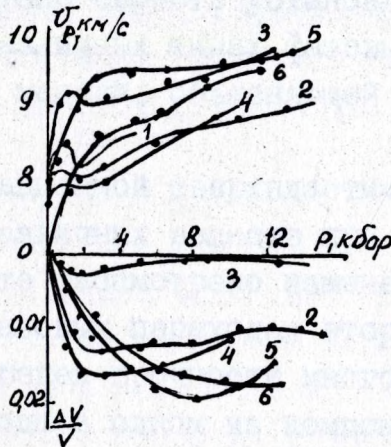


Рис. 2

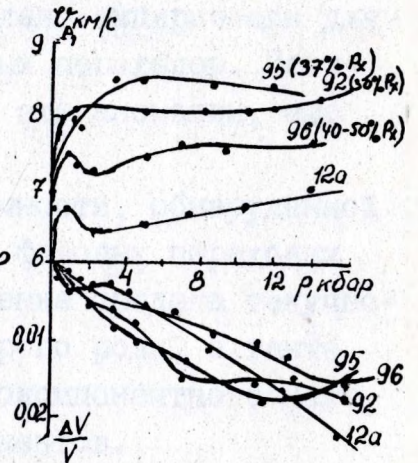


Рис. 3

ANOMAL BEHAVIOR OF ELASTIC CHARACTERISTICS OF CLYNOPIROXENS AT HIGH PRESSURE.

M. P. VOLAROVICH, G. A. EFIMOVA, S. M. KIREENKOVA, I. B. SAFAROV



## О СВЯЗИ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПРИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДАХ С ГЕОДИНАМИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ.

В.А.Калинин, И.С.Томашевская, М.В.Родкин

Институт физики Земли АН СССР

Влияние фазовых переходов на происходящие в Земле процессы неоднократно обсуждалось многими авторами. При этом, как правило, учитывались лишь очевидные характеристики переходов, такие как изменение плотности, упругих модулей и тепловые эффекты. Не меньшую, а в ряде случаев основную роль в геодинамических процессах играют реологические свойства веществ при фазовых переходах.

Реологические свойства, приобретаемые твердыми телами во время фазовых превращений, существенно отличаются от соответствующих свойств этих же веществ в стабильных фазах. Такое аномальное изменение свойств установлено эмпирически для многих веществ при различных типах фазовых переходов. Построение теоретической модели, объясняющей эти аномалии, еще не завершено.

Помимо трансформационной сверхпластичности, обнаруженной экспериментально у различных веществ при фазовых переходах первого рода, в работе рассмотрено изменение предела текучести при структурных фазовых переходах второго рода, а также изучено влияние на предел прочности многокомпонентного материала фазового перехода в одном из компонентов.

Изменение предела текучести получено в опытах по одноосному сжатию поликристаллических образцов сегнетовой соли, испытывающей структурный фазовый переход второго рода при температуре точки Кюри. Установлено, что предел текучести при этом переходе на 15-20% ниже, чем в обеих стабильных фазах. Понижение предела текучести наблюдается в узкой области  $\pm 2^\circ\text{C}$  около температуры перехода.

Предел прочности многокомпонентных веществ, какими являются горные породы, изучался в опытах по одноосному сжатию гранита. Показано, что вблизи температуры  $\alpha-\beta$  перехода в кварце (одном из компонентов гранита) предел прочности гранита значительно ниже, чем при температурах выше и ниже указан-



ной.

Большинство породообразующих минералов, как известно, испытывает различные фазовые переходы при давлениях и температурах присущих коре и мантии Земли. Более того, анализ физической природы аномальных реологических свойств твердых тел при фазовых переходах наводит на мысль о появлении аналогичных свойств при достаточно быстрых химических реакциях в твердой фазе и при метаморфических превращениях. Таким образом, в коре и мантии имеется множество границ раздела, на которых при соответствующих условиях могут проявляться аномальные реологические свойства веществ.

Рассмотрена связь этих свойств с различными геодинамическими процессами. В частности, явления шарьяжной тектоники и образование дисгармоничной складчатости. Особое внимание уделено модели генезиса глубокофокусных землетрясений, в которой возникновение землетрясения связано с процессом развития трансформационной сверхпластичности при фазовом переходе.

В модели принято, что зона Беньофа является погружающейся литосферной плитой. Полиморфные переходы в веществе плиты происходят примерно на тех же глубинах, что и в веществе мантии. Однако, из-за более низкой температуры плиты граница раздела фаз в плите не плоская, как в мантии, а имеет форму вала. Крутой склон вала обращен к океану, пологий к континенту. Когда очередной, примыкающий к поверхности вала, тонкий слой вещества погружающейся плиты пересекает границу раздела фаз и превращается из одной модификации в другую, вещество этого слоя на короткое время фазового перехода приобретает сверхпластичные свойства. За это время действующие в плите негидростатические силы производят подвижку вдоль разделяющей фазы поверхности. Таким образом, ослабленная при фазовом переходе поверхность раздела является глубинным аналогом приповерхностной разломной зоны.

Из этой модели вытекает ряд следствий, подтверждаемых геофизическими данными. В частности, из нее следует существование критической скорости погружения плит. Если плита погружается со скоростью большей критической, то в ней про-



исходят глубокофокусные землетрясения. Если же скорость погружения меньше критической, то плита на больших глубинах асейсмична. По геофизическим данным критическая скорость равна примерно 7 см/год.

Из анализа пространственного распределения гипоцентров землетрясений и ориентации их фокальных механизмов для Курило-Камчатской сейсмической зоны получено, что глубокофокусные землетрясения распределены в пространстве не хаотически, а концентрируются на глубинах фазовых переходов в мантии и группируются в структуры двух видов: линейные и изометричные. Линейные структуры вытянуты вдоль глубоководного желоба, а входящие в них землетрясения имеют плоскость подвижки, круто падающую под океан, что соответствует активизации океанического склона валообразной поверхности раздела фаз в плите. Землетрясения, образующие изометричные структуры, имеют плоскость подвижки полого опускающуюся под континент, что согласуется с представлениями об активизации континентального склона поверхности фаз.

Известно, что на глубинах фазовых переходов в мантии зоны Бенъофа изменяют свой угол наклона. Согласно рассматриваемой модели, поворот нижней части плиты относительно верхней наиболее легко может происходить по валообразной поверхности раздела фаз. Из анализа фокальных механизмов глубокофокусных землетрясений для ряда зон Бенъофа установлена тесная связь между изменениями угла наклона зоны Бенъофа, ориентацией плоскости подвижки и направлением подвижки в очаге.

#### ON THE RHEOLOGICAL PROPERTIES OF SOLIDS DURING PHASE TRANSFORMATIONS AND THEIR RELATION TO GEODYNAMICAL PROCESSES.

V.A.Kalinin, I.S.Tomashevskaja, M.V.Rodkin

The anomalous rheological properties of solids during phase transformation and their applications in geodynamics are considered. The model of deep earthquake source process based on the transformational superplasticity is discussed in more detail. The consequences from the model are considered in connection with the available geophysical data.



ХАРАКТЕР КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ МИНЕРАЛЬНОГО ВЕЩЕСТВА В ШИРОКОМ ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР

Э.И.Пархоменко

Институт физики Земли АН СССР, Москва

Установление корреляционных связей между физическими параметрами минерального вещества является важным звеном в понимании физики изучаемых явлений и, в частности, механизма электропроводности и поляризации.

Нами изучались следующие корреляционные зависимости: электросопротивление  $\rho$  - диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$ , диэлектрическая проницаемость - энергия активации  $E_0$ , предэкспоненциальный коэффициент сопротивления  $\rho_0$  - энергия активации. У всех исследованных минералов и горных пород в интервале температур 200-900°C наблюдается обратно пропорциональная зависимость между  $\lg \rho$  и  $\lg \epsilon$ , которая для высокоомных минералов и горных пород аппроксимируется одной линией регрессии  $y = ax + b$ , а для минералов с относительно низким сопротивлением - двумя, т.е. прямой с изломом/рис.1. Для преобладающего числа минералов рассматриваемые точки излома соответствуют изменению в ходе прямых  $\lg \rho = f(\frac{1}{T})$  и  $\lg \epsilon = f(\frac{1}{T})$ . Коэффициент корреляции  $\chi_{\epsilon, \rho}$  для этих параметров отличается как при фиксированной температуре, так и в интервале 200-900°C высокими значениями 0.82-0.99. Важно отметить, что при определенной частоте, например  $10^3$  Гц, точка излома прямой  $\lg \rho = f(\lg \epsilon)$  для всех минералов соответствует примерно  $\lg \epsilon \approx 2$ . Это позволяет высказать предположение об изменении механизма поляризации при достижении  $\epsilon \approx 100$ , которую принимаем за критическую величину  $\epsilon_k$ . Значение  $\epsilon_k$  в основном является функцией частоты электрического поля и в меньшей степени зависит для минералов от кристалло-химических особенностей, а для пород от петрохимических свойств. С повышением частоты она уменьшается. Если на частоте  $10^3$  Гц составляет 100, то на  $10^5$  Гц соответствует 10-50.

Экспериментальные точки, отражающие связь энергии активации  $E_0$  с  $\epsilon$  для минералов и некоторых пород, ложатся на две расходящиеся прямые. В одном случае уменьшение  $E_0$  от 1 до 0.4эВ приводит к увеличению  $\epsilon$  до 200, в другом всего



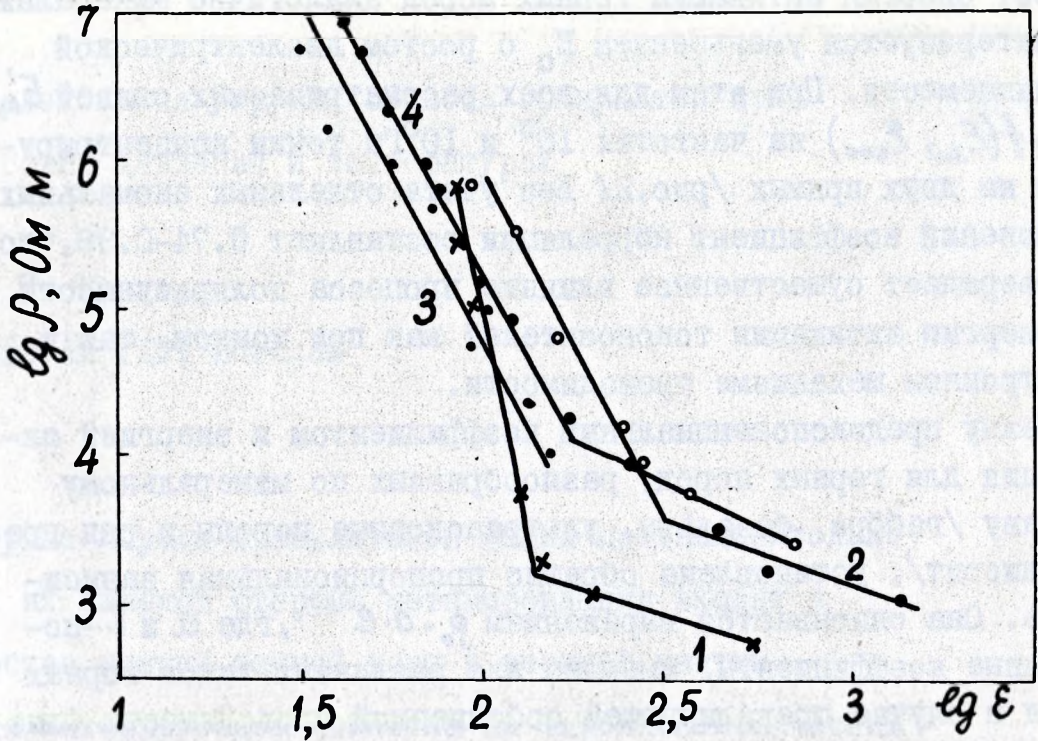


Рис.1 Характер связи электросопротивления с диэлектрической проницаемостью у минералов. 1- геденбергит, 2-этирин, 3-энстатит, 4- сподумен

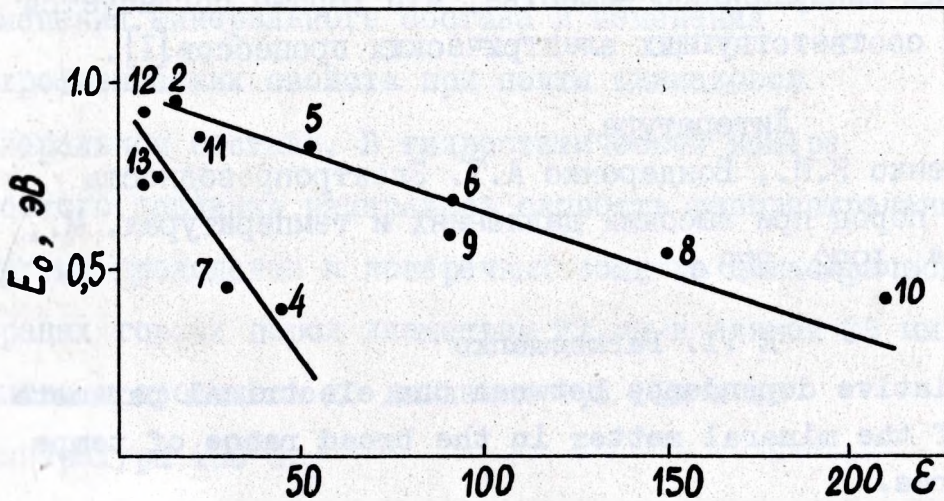


Рис.2. Характер связи диэлектрической проницаемости при 10 Гц с энергией активации в области примесной проводимости для минералов 1-микроклин, 2-энстатит, 3-тремолит, 4-жадеитит, 5-6-родусит, 7-альмандин, 8-андрадит, 9- геденбергит, 10-этирин 11-сподумен, 12-актинолит



до 50. Энергия активации горных пород аналогично минералам характеризуется уменьшением  $E_0$  с ростом диэлектрической проницаемости. При этом для всех рассматриваемых связей  $E_0$ ,  $E_0'' = f(\epsilon_{300}, \epsilon_{1000})$  на частотах  $10^3$  и  $10^5$  Гц точки концентрируются на двух прямых /рис.2/. Без учета отдельных аномальных отклонений коэффициент корреляции составляет 0.74–0.96, что подтверждает существенное влияние процесса поляризуемости на энергию активации токоносителей как при ионном, так и электронном механизме проводимости.

Между предэкспоненциальным коэффициентом и энергией активации для горных пород, разнообразных по минеральному составу /габбро, базальты, ультраосновные породы и ряд гранит-диорит/, установлена обратно пропорциональная зависимость. Она описывается выражением  $\rho_0 = a \cdot e^{-bE_0}$ , где  $a$  и  $b$  – постоянные коэффициенты, имеющие для различных типов горных пород в случае преобладающей собственной проводимости близкие значения. Область примесной проводимости отличается существенно меньшей величиной этих коэффициентов.

Представленный материал, достаточно убедительно показывает существование тесной связи между электрическими характеристиками минерального вещества, что хорошо согласуется с физикой соответствующих электрических процессов [1].

#### Литература.

- I. Пархоменко Э.И., Бондаренко А.Т. Электропроводность горных пород при высоких давлениях и температурах. М., "Наука", 1972, 278 с.

E .I. Parkhomenko

Correlative dependence between the electrical parameters of the mineral matter in the broad range of temperatures.



# Исследования упругих свойств гранулитов при высоких давлениях и температурах

Х. П. Мюллер

ЦАФЗ АН ГДР, Потсдам

Горные породы гранулитовой фации предположительно по их высокой степени метаморфизации входят в состав нижней земной коры и верхней мантии. Для интерпретации вещества по глубиносейсмическим профилям необходимы лабораторные данные, так как причиной для непрерывно и скачкообразно изменяющихся скоростей распространения упругих волн могут быть изменения минерального состава и изменения петрофизических свойств при почти одинаковом минеральном составе. В гидростатической камере высокого давления измерялась скорость распространения упругих продольных и поперечных волн на цилиндрических образцах горных пород диаметром 22 мм и длиной 25 мм. Опытные проводились до давления 1,5 ГПа и до температуры 400<sup>0</sup>С.



Отношение между структурой и свойствами  
минералов и кристаллических веществ при  
высоких давлениях и температурах

А. Крафт

ЦИФЗ АН ГДР, Потсдам

В последние годы удалось получить большое количество данных о структуре минералов и других кристаллических веществ и их поведение при высоких давлениях путем дальнейшего развития экспериментальной техники. В результате таких исследований взаимоотношения между изменением в кристаллической структуре под давлением и наблюдаемыми макроскопическими свойствами станут все лучше понятными. Это касается и механизмов фазовых переходов при высоких давлениях и температурах. На примерах обсуждаются экспериментальные результаты, механического, электрического и оптического поведения. Показываются взаимодействия между электрическими и механическими явлениями для соединений переходных элементов, которые могут привести к аномальным сжимаемостям. Дается обзор об имеющихся экспериментальных возможностях и тенденциях развития.



## О динамике и энергетике в ядре Земли

С. Франк, Х. Штиллер

ЦИФЗ АН ГДР, Потсдам

Есть некоторые модели для поддержания движений, которые приводят к возникновению геомагнитного поля. В этой работе мы исследуем модель возраста внутреннего ядра и вымораживания железной компоненты при кристаллизации. Следует из физики высоких давлений что очень вероятно существование неспособности смешиваться в жидком состоянии система Fe-C при условиях как в ядре Земли. Поэтому возрастающее внутреннее ядро приводит к нуклеации маленьких капель Fe-C, которые поднимаются. При этом гравитационная энергия поддерживает движения для геодинамо. Энергия хватает для динамо с тороидальным полем средней величины.



## О МЕХАНИЗМЕ ОСТАТОЧНОЙ ДЕФОРМАЦИИ МРАМОРА ПРИ СЛОЖНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

Е.И.Бажк, Г.Н.Юрель, А.П.Розникова, В.А.Мансуров  
(ИГиРГИ, Москва; ИФИМП, Фрунзе, СССР)

При деформировании образцов горных пород в условиях неравномерного всестороннего сжатия за пределом упругости наблюдается увеличение объема, связанное с микротрещинообразованием (Бриджмен, 1955; Ставрогин, 1968; Павлова, 1975; Воларович, Томашевская, 1979). Однако механизм развития деформаций, приводящих к увеличению объема, изучен еще недостаточно.

Работа посвящена исследованию микроструктурных нарушений в образцах мрамора, испытанных в условиях сложного напряженного состояния типа  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ . Для этого использовались методы оптической микроскопии с подсчетом трещинных параметров в шлифах и автоматический количественный подсчет структурно-текстурных характеристик с помощью электронно-счетного устройства "Квантимаг-720". В качестве объекта исследования были выбраны две разновидности мрамора месторождения Чечкан Киргизской ССР гранобластовой структуры, массивной текстуры, отличающиеся друг от друга размером зерен, слагающих породу.

Образцы цилиндрической формы длиной 8 см и диаметром 3 см испытывались в камере высокого давления (Ставрогин, 1976) при скорости деформации  $10^{-6}$  1/м и разном боковом давлении. Как следует из таблицы, при одинаковом боковом давлении мелкокристаллический мрамор имеет более высокие деформационно-прочностные характеристики, чем крупнокристаллический.

Микроскопический анализ ориентированных исходных и деформированных образцов показал, что с увеличением бокового давления растет количество кристаллов с полисинтетическими двойниками; уменьшаются прямолинейные контакты между зернами и увеличиваются вторичные контакты вдавливания; усиливается дробление зерен; появляется мелкая фракция, заполняющая трещины; изменяется морфология пустотного пространства.



В результате сканирования поверхностей аншлифов среднего сечения образцов получены следующие параметры: площадь пустотного пространства ( $A, \%$ ); средний размер хорд пор и трещин ( $H, \text{мк}$ ); абсолютная удельная поверхность ( $S, \text{мм}^{-1}$ ), то есть число пересечений сканирующих линий с контуром пустотного пространства, приходящихся на 1 мм; фактор формы ( $F$ ).

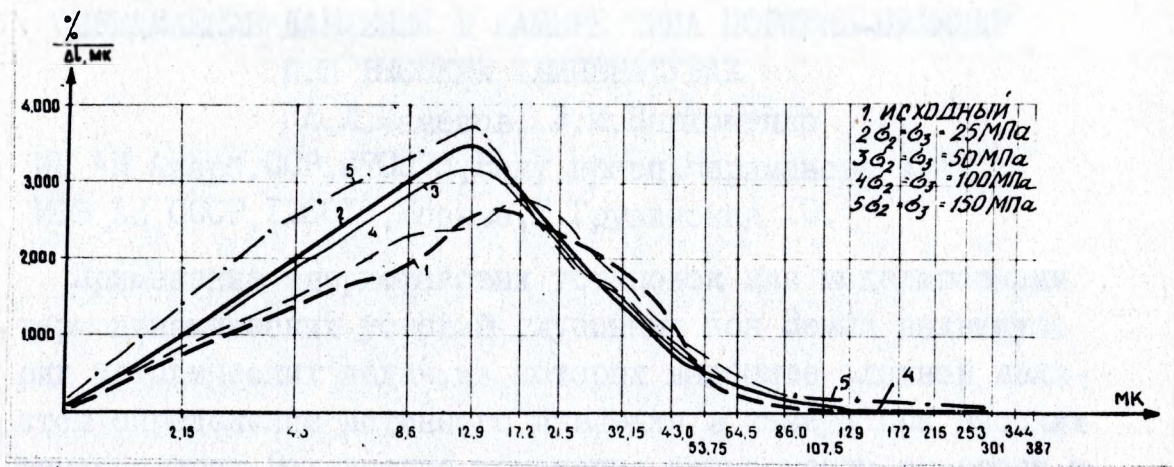
Таблица

$\sigma_2 = \sigma_3,$ МПа	Предел прочности, МПа	Увеличение объема, %	$A,$ %	$H,$ мк	$S,$ $\text{мм}^{-1}$	$F$
Крупнокристаллический мрамор						
Исходный			0,5	7,0	2,87	0,141
250	71	1,8	4,87	20,59	9,46	0,165
500	163	6,14	9,42	33,0	11,57	0,120
1000	248	20,0	12,3	37,0	13,07	0,12
1500	286	18,1	10,9	46,0	9,48	0,16
Мелкокристаллический мрамор						
Исходный			1,01	15,0	2,75	0,165
250	93	2,19	3,85	21,12	7,28	0,121
500	188	6,7	6,97	21,0	13,3	0,089
1000	255	12,2	8,12	23,0	14,0	0,068
1500	318	21,0	18,54	47,0	15,6	0,124

Как видно, увеличение объема образца в эксперименте связано с увеличением параметров  $A$  и  $H$ . При этом уменьшение  $F$  свидетельствует об усложнении контура и большей извилистости границ пустотного пространства и сопровождается увеличением удельной поверхности  $S$ .

Информативным показателем кинетики трещинообразования являются дифференциальные (или интегральные) кривые распределения хорд пустотного пространства по размерам (рис. 1). В крупнокристаллическом мраморе наибольшие изменения структуры отмечаются при  $\sigma_2 = \sigma_3 = 100$  МПа. Это изменение выражено увеличением количества крупных пор и трещин, смещени-





ем максимума дифференциальной кривой вправо и более крутым наклоном правой части кривой.

Анализ фактического материала позволяет представить последовательность микроструктурно-текстурных преобразований следующим образом. На первых этапах продольного нагружения происходит локальная концентрация напряжений, которая вызывает деформацию отдельных кристаллов кальцита. Эта деформация выражается в виде трансляции, двойникования и возникновения внутрикристаллических трещин, ориентированных под разными углами к плоскостям спайности. Процесс накопления внутрикристаллических трещин (I генерация) зависит от уровня напряжений, характера взаимоотношения зерен и их размера. Чем меньше размер зерен, слагающих породу, тем большая концентрация микротрещин необходима для перехода к макроразрушению (Куксенко, 1982). При достижении некоторой пороговой концентрации начальных микротрещин происходит их слияние и развитие ориентированных трещин скола (сдвига) (II генерация). С ними связано развитие магистральной макротрещины разрушения при сохранении большого числа опережающих ее микротрещин отрыва. Трещины II генерации вызывают увеличение объема трещинного пространства, что приводит к разуплотнению породы и росту ее фильтрационных возможностей.

#### ABOUT MECHANISM OF RESIDUAL STRAIN OF MARBLE UNDER COMPLEX STRESSED STATES

E.I. Bajuk, G.N. Jurel, A.P. Rosnikova, V.A. Mansurov

The results of the investigation of coarsegrained and fine-grained marble under stressed states  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$  are examined.



## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ В КАМЕРЕ ТИПА ПОРШЕНЬ-ЦИЛИНДР ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

А.Л.Мамедов, Э.И.Пархоменко

ИГ АН Азерб.ССР, 370073, Баку, просп. Нариманова 29А.

ИФЗ АН СССР, 128810, Москва, Б.Грузинская 10.

Применение твердофазовых установок для моделирования термодинамических условий глубинных зон Земли выдвинуло ряд методических задач, из которых наиболее сложной является определение истинного давления в камере при высоких температурах. Вследствие изменения сжимаемости, вязкости и термического расширения передающей среды в условиях высоких температур ( $T$ ), величина номинального давления ( $p_H$ ) приближается к величине давления, испытываемого образцом ( $p_{обр}$ ). Указанное приращение называется термическим приростом давления и для аппаратов типа наковальня с лункой при нагреве до  $1400^{\circ}\text{C}$  может достигать 17–64% от исходного давления при комнатной температуре /1/. Это определяет необходимость тарировки давления при высоких температурах.

Целью настоящей работы является определение давления в камере типа поршень-цилиндр, предназначенной для исследования электрических свойств горных пород при  $T$  до  $1200^{\circ}\text{C}$  и  $p$  до 2,0 ГПа /2/. Для указанных целей наиболее приемлемым явилось применение ранее не использованной зависимости эвтектической температуры плавления бинарной системы NaF-NaCl от давления /3/. В диапазоне  $1100-1200^{\circ}\text{C}$  имело смысл использовать данные по плавлению хлористого натрия /4/.

Сперва была получена указанная смесь, температура плавления которой отличалась от искомой ( $675^{\circ}\text{C}$ ) не более чем на  $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$ . Следующий этап включал непосредственное определение давления при высоких  $T$ . Точка плавления смеси фиксировалась по скачку электропроводности при четырех значениях  $p_H - 0,5; 1,0; 1,5; 2,0$  ГПа. Опыты проводились по следующей методике. После сборки и уплотнения всей системы при предельных нагрузках давление понижалось до 0,1 ГПа. Затем, для получения данных в цикле нагружения, оно повышалось до 0,5 ГПа. Далее осуществлялся медленный нагрев до момента плавления с последующим понижением температуры на несколько десятков градусов и одновременным увеличением давления на 0,7 ГПа для



кристаллизации расплава и получения данных в цикле разгрузки. Затем температура снова повышалась до первоначальной, а плавление фиксировалось уже в цикле понижения давления. Таким же образом определялись точки плавления для остальных значений  $p_H$ . Приведенные в таблице данные показывают, что относительная величина термического прироста в диапазоне 760–1144° в цикле нагрузки составляет 3,2% от номинального. Такая малая величина поправки позволяет аппроксимировать полученные результаты на больший диапазон температур. Из приведенных

T, °C	P <sub>обр</sub> , Па	Нагрузка		Разгрузка	
		p <sub>H</sub> , Па	p <sub>H</sub> , %	p <sub>H</sub> , Па	p <sub>H</sub> , %
760+5	0,458	0,5	8,5	0,415	10,0
825+10	0,92	1,0	8,0	0,84	9,6
880+10	1,39	1,5	7,4	1,276	8,9
923+10	1,86	2,0	7,0	-	-
1144+15	1,894	2,0	5,3	-	-

данных видно также, что величина поправки в каждой точке для случаев нагружения и разгружения не одинакова. Однако тарировка аппаратов поршень-цилиндр основана на допущении, что потери на преодоление трения в циклах нагрузка-разгрузка равны. Следовательно разность между номинальными давлениями обоих циклов должна представлять собой двойную величину поправки на трение. В нашем случае данное условие не выполняется. Это может быть связано с проявлением анвильного эффекта, так как величина "ошибок" имеет одинаковый знак во всех точках. Таким образом точность определения давления без учета указанного эффекта в изотермическом режиме составляет 1%. В изобарическом режиме поправка равна среднему значению величины термического прироста давления, а именно—2%.

Предложенная методика проведения опытов позволяет определить относительную величину термического прироста давления для нескольких значений T и p во время одного эксперимента, что значительно упрощает процесс калибровки и исключает погрешности, связанные с воспроизводимостью условий эксперимента.



1. Литвин Ю.А., Ишбулатов Р.А. Давление при высоких температурах в твердофазовом аппарате "наковальня с лункой". Приборы и техника эксперимента, 1975, №4.

2. Пархоменко Э.И., Мамедов А.И. Установка высокого давления для исследования электрических свойств вещества в температурном поле. В кн. Процессы и свойства вещества Земли, Наука, М., 1981, 123-129.

3. Ki-Tae-Kim, Vaidya S.N., Kennedy G.C. Effect of pressure on the temperature of the eutectic minimums in two binary systems: NaF-NaCl and CsCl-NaCl. J.Geoph.Res., 1972, v.7, N35, 6984-6989.

4. Akella J., Vaidya S.N. and Kennedy G.C. Melting of sodium chloride at pressures to 65 kb. Phys.Rev., 1969, 185, 1135-1140.

PRESSURE DETERMINATION IN APPARATUS OF PISTON-CYLINDER TYPE AT HIGH TEMPERATURES.

A.L.Mamedov, A.I.Parkhomenko

Pressure calibration of piston-cylinder apparatus was carried out at temperatures up to 1200°C to estimate the thermal increment of pressure. Dependence of melt point of NaF-NaCl binary mixture on pressure was used with this aim. The thermal increment value at increase of temperature from 760 to 1144°C was found. Considering mentioned corrections the accuracy of pressure determination in isothermal condition amounted 1%.



Анджей Цралат  
Вроцлавский политехнический институт  
Вроцлав, Польша

## СХЕМА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ПОРОДЫ

Результаты измерений образцов для высоких термобарических режимов не могут быть проверены посредством прямого измерения на месторождениях, поэтому следует уделять большее внимание абсолютному значению электрического сопротивления. В литературе приводятся многочисленные результаты измерений удельного сопротивления пород, однако в очень немногих работах рассматривается влияние измерительной схемы или же размеров образца на результаты измерений. Поэтому была предпринята работа, имеющая своей целью сравнение двухэлектродных и четырёхэлектродных измерительных схем, которые уже были или могут быть использованы для измерения электрических параметров образцов пород. Для проведения этих измерений образцы пород были моделированы образцами, выполненными из смеси графита и эпоксидной смолы. Выполненные таким образом образцы характеризовались большой однородностью /которая была испытана в отдельной измерительной схеме/, а также неизменяющимся во времени удельным сопротивлением. Программа исследований была ограничена в первом этапе двухэлектродными схемами.

В большинстве применяемых измерительных схем образец имеет цилиндрическую форму, а электроды помещены на основаниях /рис. 1а/. В работе [1] предложены две иные двухэлектродные схемы, в которых электроды помещены на образующей поверхности образца: в виде поясов /рис. 1б/ или прямоугольных электродов /рис. 1с/.

Удельное сопротивление образца породы можно определить, измеряя любым способом сопротивление между электродами:

$$R = K \cdot \rho \quad (1)$$

где:  $K$  - коэффициент, зависящий от геометрии образцов и электродов. Для схемы на рис. 1а определение  $K$  не требует пояснения. Для схемы на рис. 1б, при электродах с одинако-



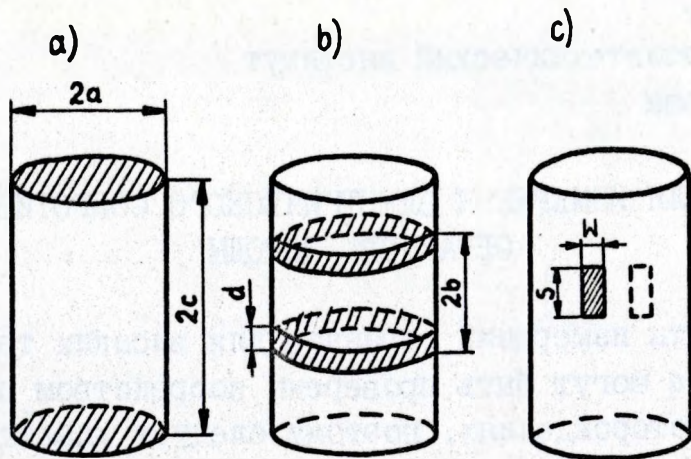


рис. 1. Двухэлектродные схемы для измерения образцов

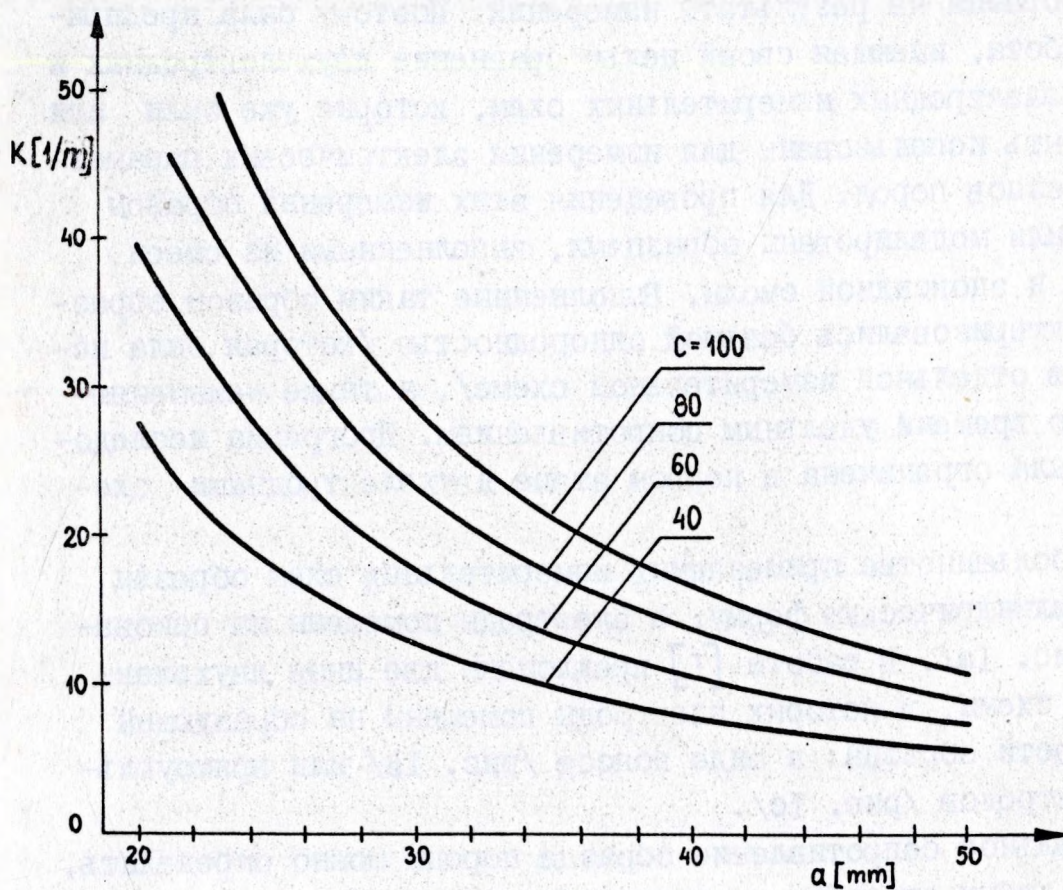


рис. 2. Коэффициент  $K$ , вычисленный из (2) для схемы по рис. 1b при  $d = 10$  мм  $b = c/2$



вой шириной и симметрически помещённых по отношению к центру образца, коэффициент определяется зависимостью:

$$K = \frac{2}{\pi c} \sum_{r=0}^{\infty} \left( \frac{I_0(kra)}{kra I_0'(kra)} \right) \left( \frac{\sin(krd/2)}{krd/2} \right) \sin^2 krb \quad (2)$$

где:  $k_r = (2r+1)\pi/2c$

$I_0$  - модифицированная функция Бесселя нулевого порядка,  
 $I_0'$  - производная функции  $I_0$ .

На рис. 2 показан коэффициент  $K$  для чаще всего встречаемых размеров образцов, вычисленный из 2 при ширине электродов  $a = 10$  мм и их межэлектродном расстоянии  $b = c/2$ .

Из проведенных экспериментов следует, что удельное сопротивление, определённое в схеме /рис. 1 /, по сравнению с определённым в применяемой до сих пор схеме отличается для отдельных образцов от -2 до -12%. Для схемы из рис. 1с не получено удовлетворительной сходимости.

Сравнение 4-электродных схем будет целью дальнейшей работы.

1. Lytle R.J., Duba A.G., Wilows J.L., Alternative methods for determining the electrical conductivity of core samples, Rev.Sci.Instrum.1979 vol.50, No.5, 611-615.

#### System for Electrical Resistivity Measurement of Rock Samples

Usefulness of undertaking of the work on comparison among different systems for measurement of rock resistivity on samples, is motivated. On the prepared sample models, two electrodes systems are compared: the used up to now /fig.1a/ and the proposed in the paper [1] and presented in the figs 1b and 1c. A good identity of measurement results between the systems in the fig. 1b and fig. 1a was obtained / -2% to -12%/, while for the system in the fig. 1c such identity was not acquired.



# ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД ИЗ РАЗЛИЧНЫХ СЕЙСМОАКТИВНЫХ РЕГИОНОВ УЗБЕКИСТАНА ПРИ ВЫСО- КИХ ТЕРМОБАРИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

МУЗАФАР Х. БАКИЕВ

Институт сейсмологии АН УзССР,  
700128, Ташкент, Ц-12, ул. Хуршида, 3

В настоящее время остро стоит вопрос о проведении региональных исследований физических свойств горных пород при высоких термобарических условиях в связи с районированием земной коры по прочностным и упругим свойствам. Результаты таких исследований также могут быть использованы для построения модели физики очага землетрясения и для решения многих других проблем геологии и геофизики.

По данным полевых геофизических исследований на территории Узбекистана последовательное вовлечение в тектонические движения осуществляется в северо-западном направлении от Ферганской межгорной впадины, через эпиплатформенные Чаткало-Кураминские горные сооружения Приташкентского района в сторону Центральных Кызылкумов молодой Туранской эпигерцинской платформы. Эти три сейсмоактивных района (Ферганский, Ташкентский и Кызылкумский), находящихся в существенно различных сейсмических и геодинамических условиях явились объектом наших экспериментальных исследований.

Из указанных территорий были отобраны породы, представляющие разного геологического возраста и различной степени консолидации. Известно, что большинство очагов землетрясений Узбекистана располагаются на глубинах 5-10 км и она сложена, в основном, гранитами, гранодиоритами и др. породами. Образцы этих пород были подвержены экспериментам в условиях гидростатического давления до 4, квазигидростатического до 15-20 и при сложно-напряженном состоянии до 10 кбар. В процессе проводимых опытов изучались упругие, деформационно-прочностные свойства и электропроводность при давлении до 20 кбар и температуре до 1200°C. Одновременно из этих образцов пород были изготовлены шлифы (до и после опытов) и по ним исследованы петрографический состав и структурные изменения, которые могли произойти в процессе приложения нагрузки.



Следует отметить, что по Ташкентскому сейсмоактивному региону изучены, в основном, керновый материал глубоких скважин пройденных как в зоне разрывных нарушений, например, с скважины "Ак-Тепа" и "Эпицентр", последняя глубиной 2,5 км пробуренная в отличие от других скважин после сильного Ташкентского землетрясения 1966 г. в его очаговой зоне, так и вне её, т.е. скважина "Овощеводство" и др.

Ниже приводятся некоторые экспериментальные результаты по сейсмоактивным регионам. На рис.1 сравниваются области зависимости скоростей продольных волн от гидростатического давления для песчаников, представляющие различные скважины и располагающиеся на разных участках зоны разрывных нарушений Ташкентского региона. Из рис.1 видно, что минимальные и максимальные скорости продольных волн для песчаников из скважин "Ак-Тепа" составили соответственно 1,08-1,84 и 2,2-4,2 км/с при давлении 2 кбар, а песчаники скважины "Эпицентр", которые перетерпели деформацию во время сильного Ташкентского землетрясения, имеют более уже область скорости продольных волн и при приложении максимального давления показывают меньшие значения скорости продольных волн, а образцы пород "Овощеводство", по средним показателям имеют сравнительно низкое значение скорости продольных волн. Это подтверждает мнение геологов, что на глубину порядка 2000-2150м данной скважины приходится "прерывистый" слой осадочно-вулканогенного образования нижнего и среднего карбона и он отличается малой плотностью и низкой степенью метаморфизма. Полученные лабораторные характеристики по скоростям для мезо-кайнозойского чехла и осадочно-вулканогенного слоя хорошо коррелируются с полевыми геофизическими данными.

На рис.2 показано сравнение области изменения скорости продольных волн с давлением до 10 кбар для гранодиоритов трех сейсмоактивных регионов Узбекистана, однако Таласо - Ферганский разлом (ТФР) был представлен породами как из зоны разлома (рис.2,3) так и вне зоны разлома (рис.2,4). Сравнение показывает, что изменения скоростей для гранодиоритов Ташкентского региона, который является переходным от одной структуры к другой и располагается между областями скоростей Кизылкумским и ТФР. Хотя Кизылкумские гранодиори-



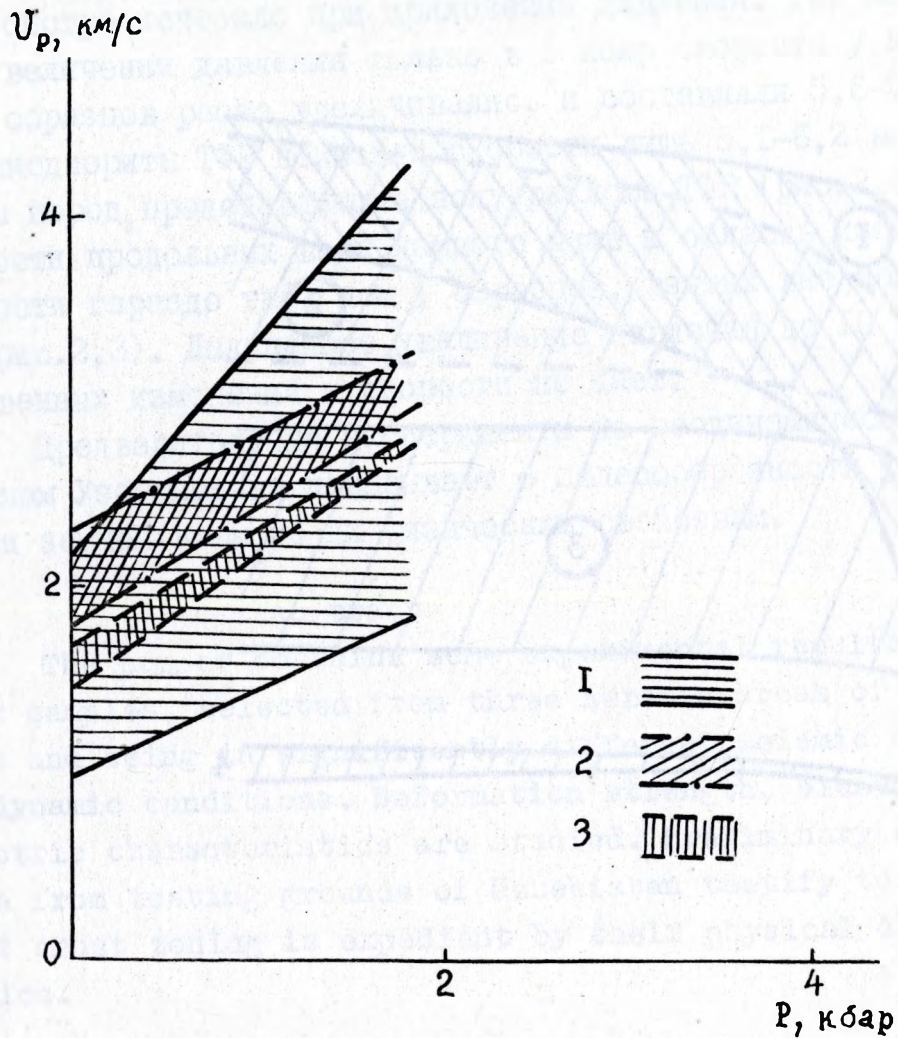


Рис. I. Зависимость скорости продольных волн от давления для образцов песчаников из скважин Ташкентского региона.

I - "Ак-Тепа", 2 - "Эпицентр" и 3 - "Овощеводство"



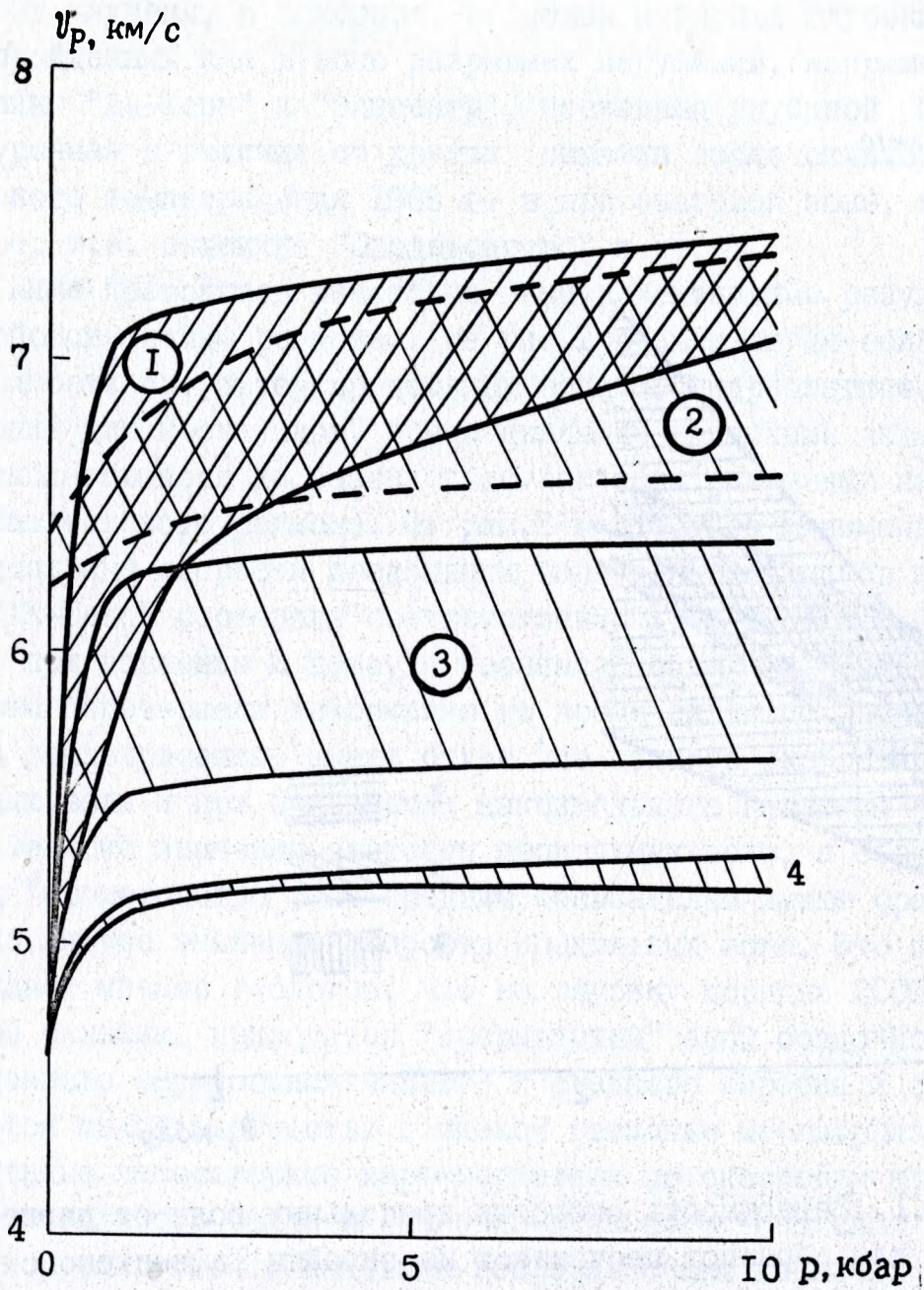


Рис.2. Зависимость скорости продольных волн от давления для образцов гранодиорита из разных регионов. 1 - Кызылкумского, 2 - Ташкентского, 3-4 - Таласо-Ферганского разлома (вне зоны разлома - 3 и из зоны разлома - 4)



ты были трещиноватыми и скорости продольных волн при атмосферном давлении были одинаковыми с образцами ТФР, т.е. соответственно 4,82-4,93 и 4,7-4,8 км/с. Однако это равенство быстро исчезало при приложении давления. Так например, при увеличении давления только в I кбар скорости у кызылкумских образцов резко увеличивались и составляли 5,6-7,1 км/с, а гранодиориты ТФР показали скорости лишь 5,1-6,2 км/с. Образцы пород, представляющие зону разлома ТФР (рис.2,4) имеют скорости продольных волн намного ниже и область изменения скорости гораздо уже, чем у образцов, взятых вне зоны разлома (рис.2,3). Дальнейшее увеличение давления до 10 кбар существенных изменений в скорости не дает.

Предварительные эксперименты по геодинамическим полигонам Узбекистана показывают о целесообразности районирования земной коры по их физическим свойствам.

#### Ab tract

The paper contains some experimental results on rock samples, selected from three seismic areas of Uzbekistan and being in significantly different seismic and geodynamic conditions. Deformation strength, elastic and electric characteristics are studied. Preliminary experiment data from testing grounds of Uzbekistan testify to the fact, that crust zoning is expedient by their physical characteristics.



О комбинировании кондуктометрии и ДТА при  
высокотемпературных исследованиях горных  
пород

В последние годы экспериментами Дуба, Олхефта, Пархоменко, Эгерера, а также нашими работами показано, что электропроводность ( $\gamma$ ) ЭП и диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon$ ) ДП горных пород при высоких р-Т условиях крайне лабильна и требует осуществления жесткого контроля над условиями окружающей среды и физико-химической стабильностью образца для получения воспроизводимых результатов на идентичных образцах в различных лабораториях.

Однако, имеется группа пород (граниты, гнейсы и т.д.), на электрические характеристики которых очень мало влияет парциальное давление кислорода, но которые обнаруживают невоспроизводимость  $\gamma$  и  $\epsilon$  при повторном нагреве и временной вход  $\gamma$  и  $\epsilon$  при постоянной (высокой) температуре. Как правило, после первоначального нагрева исчезают или ослабляются аномалии (пики) на кривых  $\gamma$  и  $\epsilon$ , что можно связать с "выжиганием" электронных дефектов, захваченных в глубоких ловушках и необратимыми фазовыми (полиморфными) переходами и скорее всего обусловлены условиями генезиса геоматериала.

Для исследования такого класса задач, которые можно определить как кондуктометрический или диэлектрический термический анализ, необходима новая аппаратура, обеспечивающая непрерывную регистрацию  $\gamma$  и  $\epsilon$  в изменяющихся условиях.

Такая методика для диэлектрических исследований осуществлена Ф.Эгерером /2/. Им же получены диэлектрические термические характеристики для ряда минералов, свидетельствующие о том, что таким методом можно изучать полиморфные переходы.



Нами произведена модификация дериватографа системы МОМ (до  $1500^{\circ}\text{C}$ ), позволяющая одновременно регистрировать кривые ДТА, ДТГ, ТГ и электропроводность на частоте 3 Кгц. Для этого используется автоматический высокоомный кондуктометр КЭЛ-1 (производство СКБ АП, Тбилиси), позволяющий регистрировать проводимость от  $10^{-8}$  до  $1$  (ом·см) $^{-1}$ .

Измельченная проба образца делится на две части, из которых одна подвергается обычному термическому анализу, а вторая помещается в высокотемпературную кондуктометрическую ячейку. Ячейка представляет собой керамический тигель для ДТА, на которую нанесены платиновые электроды методом катодного распыления в вакууме. Ячейка ДТА и кондуктометрическая ячейка помещаются в непосредственной близости друг от друга в печи дериватографа, т.е. находится в идентичных условиях.

Можно надеяться, что названная установка позволит провести интересные опыты по высокотемпературному кондуктометрическому анализу и выяснить условия генезиса, кинетику и характер полиморфных превращений горных пород.

I. T. L. Celidze, G. G. Geladze, Z. S. Avaliani. *Electrische Spectroskopie von Gesteinen. Gerl. Beitr. Geophys.* 91, 165, 1982.

2. Ф. Эгерер. Исследование процесса перекристаллизации минералов методом диэлектрического термического анализа. *Геофизический журнал*, № 5, 61, 1982.



# Вибрационный магнитометрический метод измерения характеристик намагничивания горных пород

Томаш Зелинка, Павел Гейда

Геофизический институт ЧСАН, Прага

**Summary :** A modification of the vibration magnetometric method for measurement of magnetization characteristics of rocks is presented and condition for attainment of required parameters are discussed. Finally selected properties of this system are demonstrated.

## 1. Введение

Замечательные свойства вибрационного метода привели нас к его разработке и к реализации магнитометра, который по своим параметрам отвечает требованиям в этой области.

Синтез системы исходил из таких требований, чтобы система позволяла измерение характеристик намагничивания горных пород с очень низкой концентрацией ферромагнитных минералов. /Например измерение горной породы с концентрацией 0,01% магнетита/.

## 2. Предпосылки достижения требуемой чувствительности.

Первой предпосылкой является оптимальное предложение собственной считывающей системы /1/. Мы применили метод математического моделирования на цифровой ЭВМ. Была предложена конфигурация считывающей системы и определены конкретные требования к другим частям системы /2/.

Критическим требованиям к генератору вибрации является минимализация поперечных колебаний, стабилизирование амплитуды и частоты вибраций. Для источника магнитного поля требуется однородность поля в рабочей области и возможность главного регулирования интенсивности поля в обеих полярностях. Обработка сигнала опирается на тот факт, что измеряемый сигнал относительно амплитуды с шумовым фоном. Для обеспечения полного вывода во всех четырех квадрантах



требуется также фазовое детектирование сигнала относительно движения образца.

В качестве генератора вибрации был применен вибратор, основанный на механическом принципе с преобразователем вращательного движения в вибрационное, который обеспечивает устойчивость амплитуды и подходящий выбор источника вращения, обеспечивает устойчивость частоты вибраций. Усточник магнитного поля состоит из ферромагнитной схемы и источника тока с регулированием тока, применяющим обратную связь в зависимости от выбранной интенсивности магнитного поля. Для обработки измеряемого сигнала был применен периодический фазово-чувствительный корреляционный анализ.

Другой предпосылкой, необходимой для достижения требуемых результатов является системное управление экспериментом и обработка данных на более высоком уровне. Надо обеспечить автоматическую последовательность действий в соответствующих временных отношениях с критериями оптимализации в последующей связи с оценкой измеряемых результатов в реальном масштабе времени. Решение этой проблематики однозначно ведет к применению техники микро-ЭВМ.

Третьей предпосылкой успешного решения поставленной задачи является создание подходящего регрессионного алгоритма, который также обсудит информационный уровень полученных результатов. Важным результатом вычисления, кроме получения чертежей ходов, является также определение основных параметров /включая энергию первичных и гистерезисных потерь и ходы изменений дифференциальной восприимчивости/.

### 3. Свойства реализованной системы.

Предельная чувствительность была определена статистической обработкой измеренного хода характеристики намагничивания минерала полевой шпат. Было установлено значение  $J = 10^{-9} \text{ Wbm/kg}$  для образца с диаметром  $d = 8$  мм и длиной  $l = 10$  мм. Система измерения полностью автоматизирована, включая вывод кривой и вычисленных параметров. На рис.1 приводятся ходы изменений характеристик намагничивания 0,01% концентрации магнетита в полиэфирном скелете /образец №35/ и содалитового фонолита - местность Враняны - образец №419. Из сравнения ясно, что математическая обработка вызвала дальнейшее повышение разрешающей способности метода /практически даже на порядок/.



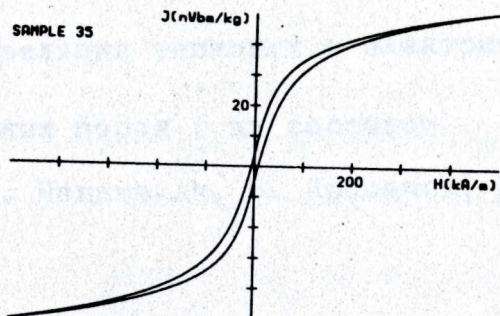


Рис.1.

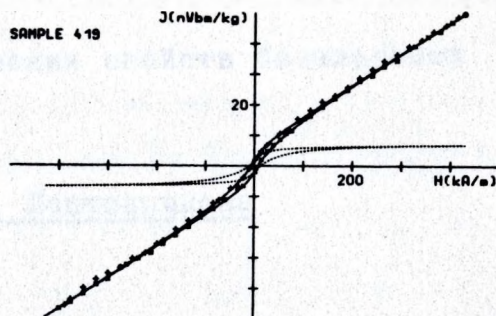


Рис.2.

#### 4. Заключение

Предложенные результаты указывают на замерзательные свойства часто пренебрегаемого вибрационного метода. Способность измерения характеристик намагничивания также при очень низких концентрациях ферромагнитных минералов предоставляет новые возможности в этой области.

- /1/ T.Zelinka : Analysis of the Vibrational Magnetometric Method. *Studia geoph. et geod.*, 23(1979), 299.
- /2/ T.Zelinka, P.Hejda, J.Bochníček : Modelling of the Sensing System of the Vibrational Magnetometer. *Studia geoph. et geod.* 25(1981), 272.
- /3/ J.Bochníček, T.Zelinka : The Vibrational Magnetometer and the Processing of its Output Signal Strongly Affected by Noise. *Studia geoph. et geod.* 27(1983), (in print).



Корреляция тепловых и электрических свойств базальтовых  
горных пород с их составом

З.В. Чанишвили, В. Кропачек, М. Лаштовичкова

Summary: There is a complex interpretation of the temperature dependence of heat, temperature and electrical conductivity, and the temperature dependence of specific heat of 15 alkaline volcanic rocks from Bohemian Massif on their chemical composition, modal composition and density.

Работа является первой попыткой комплексной интерпретации температурной зависимости теплопроводности, температуропроводности, электропроводности и температурной зависимости теплоемкости 15 щелочных вулканических горных пород с Чешского массива от их химизма, модального состава и плотности. Из установленных температурных зависимостей теплоемкости были выведены изменения энтальпии и энтропии. Эти термодинамические параметры потом позволяют определить внутреннее энергетическое состояние данного образца и исследуемые физические величины привести в соответствие с энергетической классификацией при помощи свободной энергии Джиббса и таким образом уловить энергетические изменения в течение фазовых и химических изменений в ходе измерений в области температур 20 - 900°C. Экспериментальные методики приводятся в работах /1,2/.

Из собственных химических анализов /3/ и петрографического размещения исследуемых горных пород вытекает зна-



чительная изменчивость как в отношении их химизма, так и в отношении содержания породообразующих минералов. Для температурной зависимости теплопроводности является характерной переменность отдельных кривых, хотя значение теплопроводности изменяется приблизительно только в пределах  $\pm 10\%$  начального значения данного образца /3/. Кривые температурной зависимости электропроводности для большинства образцов характеризуются резким возрастанием электропроводности при температуре выше  $300^{\circ}\text{C}$ . Это возрастание достигает даже нескольких порядков /3/.

Полученные результаты показывают, что существуют статистически важные связи, в соответствии с которыми теплопроводность возрастает с ростом содержания оливина, а теплоемкость возрастает с ростом содержания щелочей и убывает с ростом содержания оливина и с ростом плотности. Важные связи были также найдены для зависимостей химизма или модалного состава горной породы от изменений термодинамических величин. В данном наборе образцов не была обнаружена статистически значительная связь между теплопроводностью и электропроводностью, а была обнаружена между теплопроводностью и  $\log(\sigma T) / \sigma$  - электропроводность/.

- /1/ M. Laštovičková, J. Popule, *Studia geoph. et geod.* 13, 1974, 370.  
/2/ З.В. Чанишвили, *Сообщения АН ГССР*, 96, №1, 1979. 153.  
/3/ Z.V. Chanishvili, V. Kropáček, M. Laštovičková, *Geoph. sb. Academia, Praha* /in press/.



## НОВЫЕ МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЗМА ПОВЕДЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ВЫСОКИХ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРАХ.

А.П.Дмитриев, Г.Я.Новик, М.Г.Зильбершмидт  
Московский горный институт, П7049,  
Москва, Ленинский проспект, 6.

Специфика поведения горных пород при высоких термодинамических параметрах обусловлена проявлением таких характерных признаков неоднородности строения, как наличие микроструктуры и определенное состояние её элементов, различие и анизотропия свойств породообразующих минералов, особенность поведения межзеренных границ и т.д. Использование феноменологических подходов при описании изменения свойств пород, подвергающихся внешнему воздействию, позволяет установить некоторые общие закономерности изменения, однако, не описывает существа процесса, что в свою очередь повышает вероятность использования неправильных концепций при объяснении результатов.

Неоднородность строения вызывает протекание в породе процессов, связанных с вариацией напряженного состояния зёрен — структурными напряжениями (СТН). Количественную оценку СТН в породах с неупорядоченным строением предлагается проводить с привлечением вероятностно-статистического метода, а для пород с упорядоченной микроструктурой используют решения полученные для регулярных моделей. Неоднородность поля деформаций в породе оценивали на основе значений материальных тензоров и усредненных свойств породообразующих минералов. Расчеты показали, что вариация локальных напряжений в зёрнах однокомпонентной породы может достигать 30–35%. Для многокомпонентной породы вариация напряжений может быть значительнее. Величина тепловых структурных напряжений при температурах порядка 300°C в большинстве случаев соизмерима с пороговыми значениями напряжений, соответствующих началу протекания неупругих микродеформаций. Характерно, что неоднородность напряженного состояния зёрен породы при нагружении и тепловом воздействии различна.



Экспериментальное исследование механизма поведения пород при высоких термобарических параметрах предлагается осуществлять с использованием специального методического подхода, который дает возможность получать информацию о состоянии элементов микроструктуры и межзеренных границ пород. Его основу составляют: оптическая, просвечивающая (SEM) и растровая электронная микроскопия (TEM), рентгенография. Однако, в отличие от традиционных исследований остаточных явлений, предлагается изучать породу непосредственно в процессе внешнего воздействия. Для этой цели разработан ряд приспособлений и устройств, позволяющих проводить исследования образцов нагреваемых до 1000 С, подвергаемых одноосному нагружению в различных режимах до разрушения, а также действию изгибающих нагрузок. Для обработки данных, в частности, для анализа профилей рефлексов дифракционной картины рассеяния рентгеновского излучения используется ЭЦВМ.

Установлено, что наблюдаемые зависимости СТН от параметров внешнего воздействия отличаются от теоретических закономерностей полученных для упругой задачи. Это свидетельствует об активизации действия пороговых и непороговых механизмов пластических микродеформаций. Неупругие микродеформации сопровождаются появлением микродефектов.

Установлено, что процесс повреждения микроструктуры при интенсивном РТ воздействии носит многостадийный характер, вызванный различием значений пороговых напряжений активизации того или иного механизма неупругой деформации её элементов. Исследования безрудных и рудных кварцитов, гранитов, уртитов и ряда других горных пород подтвердили предположение об аналогичном поведении одних и тех же минералов, находящихся при высоких термодинамических параметрах. Отличие в механизме изменения микроструктуры чаще всего вызывается особенностями строения межзеренного пространства.



# NEW TECHNIQUES AND RESULTS OF ROCK BEHAVIOUR MECHANISM STUDY AT HIGH THERMODYNAMIC PARAMETERS

A.P.Dmitriev, G.Ya.Novyk, Zilberschmidt M.G.

The paper describes new methodic approach to research into rock behaviour mechanism at high thermodynamic parameters. New experimental data are given.



# О МЕХАНИЗМЕ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ ЖЕЛЕЗИСТЫХ КВАРЦИТОВ ПРИ ДЕЙСТВИИ ВЫСОКИХ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Т.К.Заворыкина, М.Г.Зильбершидт, А.Н.Ряполов

Московский горный институт, П7049, Москва, Ленинский  
проспект, 6

Рассматривая железистый кварцит как многокомпонентный поликристаллический агрегат, можно показать, что величина структурных напряжений в зернах руды при объемном нагружении определяется следующими параметрами:

- различием упругих параметров мономинеральных агрегатов кварца, гематита и магнетита;
- анизотропией упругих параметров зерен породообразующих минералов;
- величиной относительного объемного содержания кварца, магнетита и гематита.

Используя вероятностно-статистический подход к описанию поля напряжений в железистом кварците, показано, что при динамическом нагружении наибольшие напряжения должны быть в зернах магнетита, меньшие значения в кварце. Причем, в минеральном агрегате кварца вариация напряжений больше, больше чем в агрегатах других породообразующих минералов. В свою очередь изменение состава оказывает существенное влияние на напряженное состояние зерен руды. Специфика напряженного состояния элементов микроструктуры железистого кварцита при интенсивном динамическом нагружении проявляется в процессе инициирования неупругих микродеформаций в породе, связанных с повреждением зерен, межзеренных границ и трещинообразованием. Причем, трещинообразование в межзеренном пространстве является следствием неупругого поведения зерен.

Образцы кварцитов подвергались динамическому воздействию в интервале нагрузок 20 - 1000 МПа.



Экспериментальное исследование образцов показало, что начиная с некоторого порогового значения амплитуды волны напряжений наблюдается рост величин остаточных структурных напряжений, плотности дислокаций в зернах магнетита, а также уменьшения размера области когерентного рассеяния. Причем, при интенсивных нагрузках (свыше 210 МПа) изменение состояния зерен магнетита резко замедляется, что свидетельствует об активизации неупругого поведения других минералов (гематита, а затем кварца). При амплитудах нагружения свыше 500 МПа образцы начинают разрушаться по слоистости.

Анализ результатов дает возможность выделить 4 основные стадии механизма изменения свойств при интенсивном динамическом нагружении. На первой стадии, когда локальные напряжения в зернах породообразующих минералов не превышают порога их неупругой деформации, имеет место упругое поведение элементов микроструктуры руд. Вторая стадия соответствует величине напряжений в отдельных зернах минералов, превышающей начало процесса пластической микродеформации в них, который развивается сначала в магнетите и не сопровождается образованием микродефектов. Для исследованных железистых кварцитов вторая стадия начинается при амплитуде волны напряжений порядка 100 МПа.

На третьей стадии в железистых кварцитах начинаются процессы микродеформации, связанные с образованием микродефектов. Установлено, что взаимодействие дислокационных полос скольжения в зернах магнетита друг с другом и с межзеренным пространством вызывает появление межзеренных трещин на границе кварц-магнетит, а также трещин внутри зерен магнетита. Кроме того, появляются микротрещины в зернах кварца. Причем, они преимущественно иницируются в межзеренном пространстве, переходя затем в зерно.

На четвертой стадии происходит переход микротрещин из одного зерна в другое, что можно рассматривать как процесс макроразрушения. Начало третьей и четвертой стадии, изменения микроструктуры при взрывном воздействии обычно характеризуются значением амплитуды волны напряжений, равным соответственно 500 МПа и 1000 МПа.



Наблюдаемые явления объясняют закономерность изменения магнитных свойств железистых кварцитов, подвергнутых обработке высокими динамическими нагрузками.

MECHANISM OF CHANGES OF FERRUGINOUS QUARTZITES PROPERTIES UNDER THE INFLUENCE OF HIGH DYNAMIC LOADS

Zavorykina T.G., Zilberschmidt M.G., Ryapolov A. N.  
The paper describes change phases of ferruginous quartzites microstructures at high dynamic loads.



ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВТОРИЧНЫХ ИЗМЕНЕНИИ НА  
ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УЛЬТРАБАЗИТОВ  
ПРИ ВЫСОКИХ  $p, T$ -УСЛОВИЯХ

Ш.А.Балакишиев, М.И.Исаева, А.Б.Гасанов  
Секция Физики Земли Института геологии АН  
Азерб.ССР, Баку, просп. Нариманова, 29А

Совокупность известных в настоящее время косвенных данных (состав ксенолитов в алмазоносных кимберлитах и базальтовых лавах), а также данные глубинных сейсмических зондирований и сейсмологии позволяют предположить ультрабазитовый состав подкорового вещества. Это в свою очередь вызывает необходимость всесторонних исследований физических свойств указанной группы пород и выявление причин влияющих на их величины.

В литературе известно множество подобных исследований /1,2/, в результате которых также подтверждается соответствие ультрабазитов по физическим характеристикам в условиях высоких  $p$  и  $T$  областям подкорового слоя и верхней мантии Земли. Из этих же работ следует, что одной из главных причин, влияющих на физические параметры ультрабазитов является присутствие в них серпентина, образовавшегося при разложении в результате метаморфизма основного породообразующего минерала ультрабазитов – оливина. Но предыдущими авторами исследовано влияние степени серпентинизации на упругие характеристики ультраосновных пород при нормальной температуре и небольших величинах давлений (до 4 кбар), что явно недостаточно для характеристики ультрабазитов, как возможных представителей верхней мантии.

В этой связи, выяснение влияния степени серпентинизации ультрабазитов на упругие характеристики и плотность в  $p, T$ -условиях предполагаемых на глубинах подошвы земной коры и верхней мантии представляет несомненный научный и практический интерес. Этой цели и посвящена настоящая работа. Исследованию подвергались в различной степени серпентинизированные ультраосновные породы офиолитового пояса Малого Кавказа. Выбор этой группы пород не случаен. Как известно /3/, офиолиты представляют собой выжатые из океанического фунда-



мента и тектонически выведенные на поверхность массы. Следовательно, данные полученные в результате исследования офиолитовых ультрабазитов могут характеризовать области, соответствующие верхней части верхней мантии.

Как показали результаты исследования, между степенью серпентинизации и изученными физическими параметрами ультрабазитов существует заметная корреляционная связь (см. табл. I), описываемая следующими уравнениями регрессии:

а) для скорости продольных волн

$$V_p = -0,028 C + 0,034 \rho + 7,35$$

где  $V_p$  - скорость продольных волн, км/с;  $C$  - содержание серпентина, %;  $\rho$  - давление, кбар

б) для плотности

$$\rho = 0,004 C + 0,005 \rho + 2,95$$

где  $\rho$  - плотность пород, г/см<sup>3</sup>

в) для относительной объемной деформации

$$\Delta V/V_0 = 0,0001 C + 0,0011 \rho$$

где  $\Delta V/V_0$  - относительная объемная деформация,  $10^{-4}$ .

Таблица I.

Наименование пород (номер обр.)	Содерж. серпен. %	Параметр	Значения скорости (км/с), плотности (г/см <sup>3</sup> ) и относит. объемн. деформ. при давл. (кб)			
			1	5	9	15
Серпентинизиров. дунит (I78)	27	$V_p$	6,54	6,66	7,02	7,14
		$\rho$	2,651	2,872	2,879	2,883
		$\Delta V/V_0$	2,5	9,7	12,1	13,5
Серпентинизиров. перидотит (3I77)	49	$V_p$	5,87	5,88	6,00	-
		$\rho$	2,836	2,847	2,856	-
		$\Delta V/V_0$	4,00	8,00	10,7	-
Серпентинизиров. перидотит (I277)	52	$V_p$	5,84	5,94	6,07	6,30
		$\rho$	2,743	2,756	2,762	2,773
		$\Delta V/V_0$	6,7	9,5	11,8	15,3
Серпентинит (2477)	90	$V_p$	4,96	5,29	5,54	5,82
		$\rho$	2,649	2,667	2,685	2,700
		$\Delta V/V_0$	10,0	16,6	23,7	29,0
Серпентинит (I378)	99	$V_p$	4,66	4,77	4,95	5,18
		$\rho$	2,593	2,619	2,636	2,649
		$\Delta V/V_0$	5,6	15,6	21,3	26,5

Для коррекции величин скорости продольных волн для условий одновременного воздействия давления и температуры был составлен поправочный график, приведенный на рис. I.



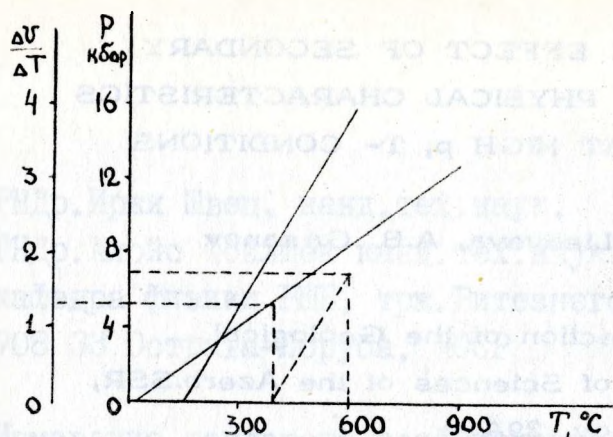


Рис. 1. Поправочный график для определения величины изменения скорости продольных волн при различных  $p, T$ -режимах.

Построение этого графика основывается на данных наших экспериментов по офиолитовым ультрабазитам при высоких  $p, T$ -условиях с привлечением литературного материала, и предполагает существование определенных сочетаний значений давления и температуры, при которых градиенты изменения величин физических параметров остаются неизменными. Это условие позволяет, задавая любые сочетания  $p$  и  $T$ , ожидаемые на больших глубинах, определять поправки в величины скоростей продольных волн и вычислять наиболее вероятные их значения.

1. Воларович М.П., Баяк Е.И. — Физические свойства ультраосновных пород и породообразующих минералов в различных условиях давлений и температур. В кн.: Проблемы петрологии гипербазитов складчатых областей. Новосибирск, 1973
2. Воларович М.П., Баяк Е.И., Левыкин А.И., Томашевская И.С. — Физико-механические свойства горных пород и минералов при высоких давлениях и температурах. "Наука", Москва, 1974
3. Пейве А.В., Богданов Н.А., Книшпер А.Л., Перфильев А.С. — Офиолиты: современное состояние и задачи исследования. Геотектоника, 6, 1977



ESTIMATION OF THE EFFECT OF SECONDARY  
VARIATIONS ON THE PHYSICAL CHARACTERISTICS  
OF ULTRABASITES AT HIGH  $p$ ,  $T$ - CONDITIONS

Sh.A.Balakishiyev, M.I.Isayeva, A.B. Gasanov

The Earth Physics Section of the Geological  
Institute of the Acad. of Sciences of the Azerb.SSR,  
Baku, prosp. Narimanov, 29A

S U M M A R Y

This work suggests the regression equations obtained at the result of analysis of experimental research data at high  $p$  and  $T$  physical characteristics of ultrabasites and permitting to estimate the effect of secondary processes. The diagram of corrections determination to the velocity values of dilatation waves for different  $p$  and  $T$  combinations, possible on the earth bark to the depths of the upper mantle, composed on the test data are also given.



РнДр. Иржи Швец, канд. тех. наук,  
РнДр. Алойс Фойлшек канд. тех. наук,  
кафедра физики ВШБ, трж. Витезнего унора,  
708 33 Острава-Поруба, ЧССР

Измерение теплового коэффициента линейного  
расширения горных пород и его использование  
в инженерной геофизике

Такач Й. Кристаллические фазы андезитовых стекол  
при высоких РТ условиях в воде.

Pesty L. /Ungarn/:

Experimental petrographische Modelluntersuchung der  
Palagonitbildung.



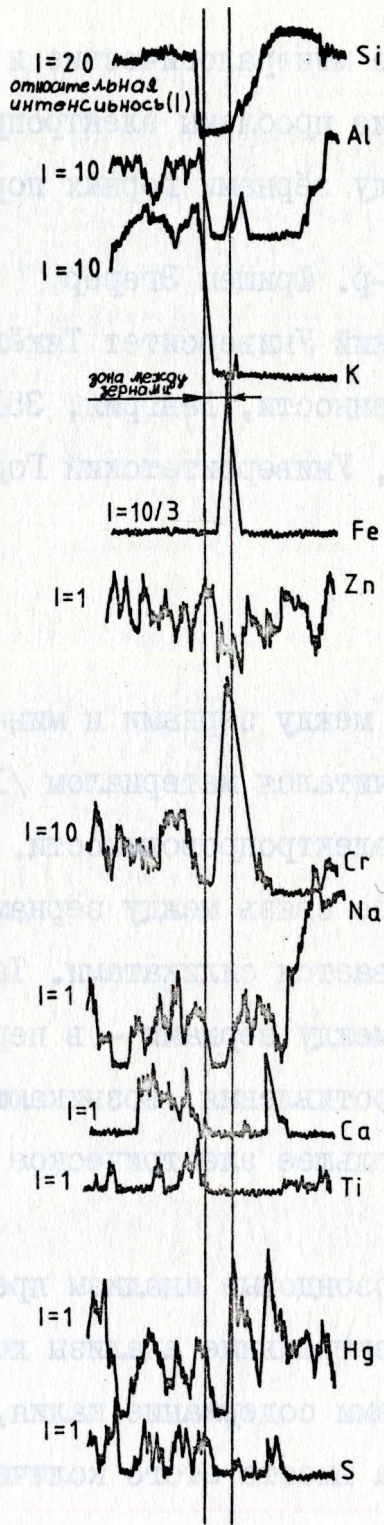
Некоторые минералогические и  
петрографические проблемы электропроводимости между зёрнами горных пород

Д-р. Фрищеш Эгерер  
Технический Университет Тяжёлой  
Промышленности, Венгрия, 3515  
г. Мишкольц, Университетский Городок

Вязущий материал между зёрнами и минералами горных пород вообще считался материалом /1,2,3,4 и т.д./, понижающим отношения электропроводимости. Во множестве случаев мы считали, что связь между зёрнами магматических пород обеспечивается силикатами. Таким образом мы считали, что зона между зёрнами – в первую очередь из-за переходного сопротивления, возникающего у соприкосновений – имеет большее электрическое удельное сопротивление.

Электронные микронзондовые анализы представляющее собой профильные и спектральные анализы хорошо показали, что в зоне между зёрнами содержание калия, кремния и алюминия понижается, а вместо этого количество хрома, железа, цинка и других элементов повышается. Это значит, что оксиды, может быть сульфиды проникают в переходную







зону. Значит, в переходную зону вставляются минералы - оксиды даже сульфиды, проводящие электрический ток намного лучше чем силикаты, и таким образом электрическое сопротивление переходной зоны может быть значительно меньше чем сопротивление зёрен силикатов.



## Литература

- I Э.И.Аархоменко, А.Т.Боднаренко:  
Электропроводность горных пород при высоких  
давлениях и температурах "Наука" Москва 1972
- 2 Т.Л.Челидзе и др.:  
Электрические и магнитные свойства горных пород  
при повышенных температурах и давлениях  
"МЕЦНИЕРЕБА" Тбилиси 1979
- 3 Y.Rzbersky, G.Novik: The Physics of Rocks  
Mir. Moscow 1971
- 4 F.Egerer: Kőzetfizika.  
Tankönyvkiadó, Budapest 1980



# НЕКОТОРЫЕ АППАРАТУРНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ В СВЯЗИ С ТЕРМОБАРИЧЕСКИМИ ИССЛЕДОВАНИЯМИ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МИНЕРАЛЬНОГО ВЕЩЕСТВА

Т. С. Лебедев, В. И. Шаповал, Б. Я. Савенко, В. А. Корчин,  
С. И. Шепель, В. Т. Василяка, А. А. Правдивый

Институт геофизики им. С. И. Субботина АН УССР  
СССР, 252180, Киев-180, ГСП, просп. Палладина, 32

В связи с исследованиями упругих, тепловых, магнитных и электрических характеристик горных пород и минералов в Отделе физических свойств вещества Земли Института геофизики АН УССР (г. Киев) создан ряд установок высокого гидростатического и квазигидростатического давления, а также выполнены многочисленные методические разработки /1-5 и др./.

1. Общая схема лабораторной установки для исследований упругих характеристик минерального вещества в условиях всестороннего давления до 8 кбар и температуры до 500-600°C изображена на рис. 1а /3/. Установка состоит из аппарата высокого давления I и мультипликатора III, соединяющихся между собой через запорный вентиль II. Корпус I аппарата высокого давления представляет собой толстостенный цилиндр из легированной стали. Рабочая камера диаметром 33 мм имеет длину

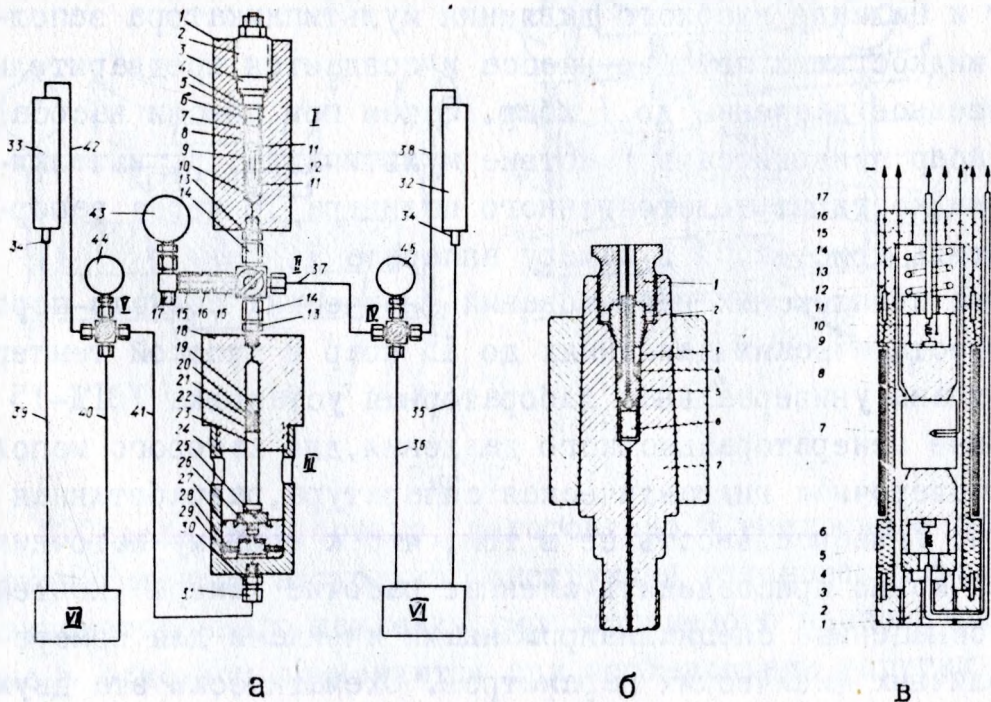


Рис. 1.



250 мм. Затвор аппарата состоит из запорной гайки 2, пробки 3 с патрубком и экстремной гайки. Камера аппарата герметизируется уплотнениями 4-5 на шейке пробки. С пробкой 3 соединяется установочный стакан 9, служащий для размещения образца породы, пьезодатчиков и нагревательного элемента. В пробке три конусных электроввода с изоляцией из шелковой оплетки, пропитанной специальным клеем. К ним с помощью разъемов 7 присоединяются указанные датчики II и контакты нагревательного элемента.

Запорный вентиль высокого давления II служит соединительным звеном между аппаратом и мультипликатором и позволяет производить предварительное заполнение их рабочих объемов жидкостью до повышенного давления. К одному из боковых штуцеров вентиля подключен пружинный манометр первого класса. Мультипликатор III установки - обычного типа. Рабочий объем цилиндра высокого давления составляет  $70 \text{ см}^3$ . Расчетный коэффициент усиления равен 25. Давление регулируют и снижают с помощью запорных вентилях IV, V. Присоединенные к вентилям манометры 44-45 позволяют контролировать давление в соответствующих узлах. Установка снабжена двумя насосами У1, УП.

Рабочий цикл установки состоит из двух этапов. Вначале аппарат и цилиндр высокого давления мультипликатора заполняются жидкостью с помощью насоса и создается предварительно повышенное давление до 1 кбар. Затем при помощи насоса до 0,3 кбар приводится в действие мультипликатор, выталкивающий жидкость из толстостенного цилиндра 18 через запорный вентиль (рис. 1а, II) в камеру аппарата I.

С целью комплексных исследований физических свойств пород при гидростатических давлениях до 15 кбар и высокой температуре создана универсальная лабораторная установка УВГД-15 / I / на базе генератора высокого давления, для которого использована поверочная гидравлическая аппаратура, разработанная ВНИИЭТРИ. Универсальность ее в том, что к единому источнику давления можно присоединять сменные рабочие камеры (контейнеры), оснащенные специализированными ячейками для измерений различных физических параметров. Схематически эта двухслойная камера показана на рис. 1б. Ее внутренний цилиндр



изготовлен из стали 45 ХМНБА, внешний - 30 ХГСА. В верхней части камеры расположено запорное устройство, а в нижней - хвостовик с резьбой для соединения с тройником генератора высокого давления. Начальное уплотнение указанного устройства достигается за счет сжатия уплотнительных колец при упоре корпуса в кольцевой выступ камеры. В зависимости от проводимых исследований к корпусу запорного устройства присоединяется соответствующая измерительная ячейка.

На рис. 1в приведен схематический разрез ячейки, использовавшейся при изучении воздействия гидростатического давления в установках до 5 и 15 кбар (при высокой температуре) на изменение скорости распространения продольных и поперечных волн в образцах пород. Все элементы ячейки собраны на пирофиллитовом цилиндрическом стакане /3/. На его наружной поверхности размещен нагреватель (7) из ленточного нихрома. Наружная изоляция состоит из слоев пленочного тефлона и слюды. Общая толщина обмотки нагревателя и изоляции составляет около 1,5 мм, что весьма важно при малых габаритах ячеек. Температура внутри камеры на образце и датчиках 6, 9 регистрируется хромель-алюмелевыми термопарами 8, 10, 15 с точностью  $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$ .

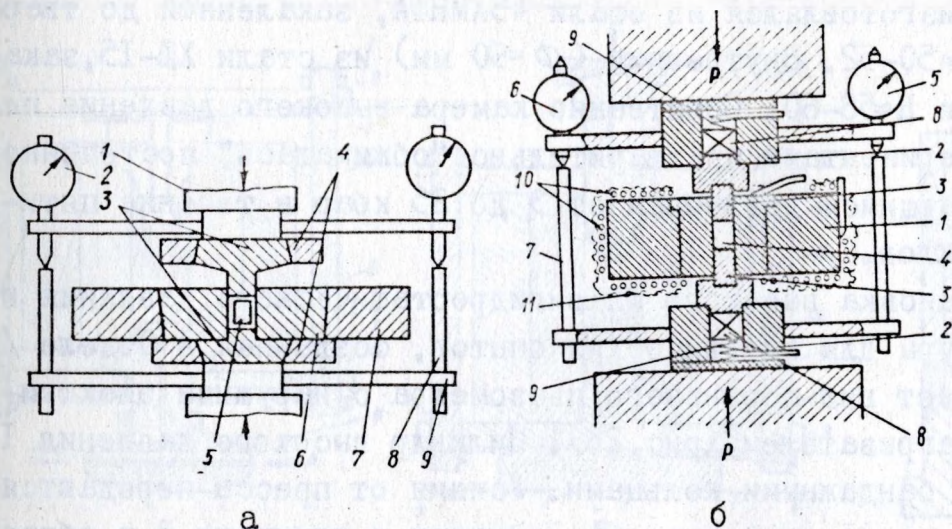


Рис. 2

В Отделе разработано, изготовлено и внедрено в практику экспериментов несколько конструкций установок высокого квазивсестороннего давления типа поршневого пьезометра, которые в основном применяются при исследовании упругих и



электрических свойств пород. Аппарат, приведенный на рис. 2а, использовался в опытах по изучению указанных параметров в диапазоне давлений до 25 кбар / I/.

Давление в рабочей камере (рис. 2а) создается путем сдавливания поршнями 3 среды, передающей давление на образец 5. Поршни и цилиндр высокого давления уплотняются скрепляющими (бандажными) кольцами 4, 7. Индикаторы перемещений поршней 2 закреплены в держателях 8, 9, которые жестко связаны с поршнями, входящими в камеру. Два часовых индикатора, расположенных на расстоянии 12–15 см от центра аппарата, позволяют учесть возможные перекосы поршней. Индикаторы регистрируют суммарную деформацию поршней, колец, уплотнителей, собственно образца и камеры, подвергнутых воздействию высокого давления. Точность регистрации перемещения поршней  $\pm 0,005$  мм. Для исключения непараллельности опорных плит пресса ИПС-200 установка в собранном виде размещается на двух сферических шарнирных поверхностях.

При изготовлении установок использовали стали ШХ-15, 45МНФА, 30ХГСА и ХВГ. Наиболее пригодной для исследований оказалась двухслойная установка с внутренним диаметром камеры 15 мм и высотой 35 мм. Внешний обжимный цилиндр ( $\phi = 190$  мм) изготовлялся из стали 45ХМНФА, закаленной до твердости  $H \approx 50-52$ . Внутренний ( $\phi = 90$  мм) из стали ШХ-15, закаленной до  $H \approx 58-60$ . Собственно камера высокого давления перед экспериментами предварительно "обжималась" постепенно увеличивающимся давлением от 3 до 25 кбар в течение пяти-шести циклов.

Установка высокого квазигидростатического давления и температуры для акустических опытов, созданная в Отделе / I/, также имеет вид поршневого пьезометра с наружным электрическим нагревателем (рис. 2б). Цилиндр высокого давления 1 укреплен бандажными кольцами. Усилия от пресса передаются через толстостенные опорные цилиндры и плунжеры 3 к образцу 4. С толстостенными опорными цилиндрами 2 жестко связаны держатели часовых индикаторов 5–6 и вертикальные штанги 7. С помощью такого устройства фиксировалось перемещение плунжера относительно какого-то исходного положения. Оно регистрировалось часовыми индикаторами с точностью  $\pm 0,005$  мм.



Камера в собранном виде устанавливается на две сферические шарнирные опоры. Датчики ультразвуковых колебаний находятся внутри толстостенного цилиндра 2 (в специально сконструированном корпусе 8) и приклеены к шлифованной поверхности плунжера. Охлаждение датчиков осуществляется с помощью специальных кольцевых каналов для циркуляции воды, расположенных в областях установки пьезокристаллов. Это позволило поддерживать температуру ультразвуковых преобразователей около 30–40°С. Внутренний нагрев камеры высокого давления осуществляется нагревательной печью (рис. 26, 10), размещающейся на двухслойном рабочем цилиндре. Печь представляет собой нихромовую спираль, намотанную на слюдяной воротник, который находится вокруг боковой поверхности и на торцевых частях камеры высокого давления. С внешней стороны нагреватель покрывается слоем асбеста и шамотной глины, которые выполняют роль хорошего теплоизолятора. Во время опытов вся система теплоизолируется с целью сохранения постоянного режима нагрева при длительной работе установки.

2. Для исследований тепловых свойств образцов минерального вещества при высоких РТ режимах опытов разработана специализированная камера с ячейками, позволяющая выполнять опыты в

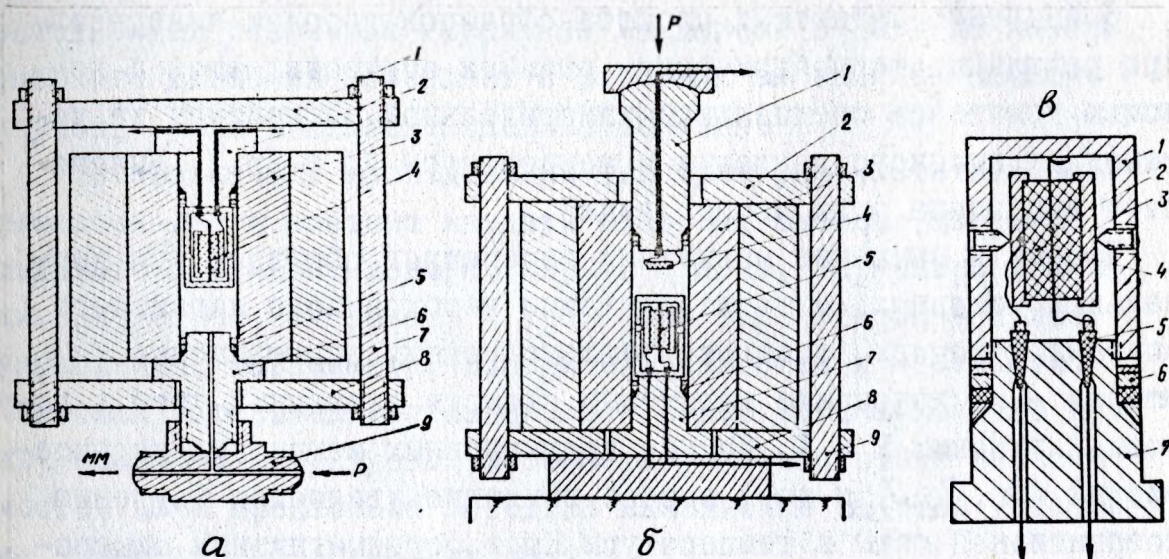


Рис. 3. Варианты конструкции камеры высокого давления (а, б) и измерительной ячейки (в) для теплофизических опытов.

а – при использовании генератора высокого давления:  
 1–верхняя плита, 2–верхняя пробка, 3–двухслойный цилиндр,  
 4–измерительная ячейка, 5–уплотнения, 6–нижняя пробка,



7-колонна, 8-нижняя плита, 9-тройник (Р - от генератора давления, ММ - к манганиновому манометру); 6 - при использовании многотонного гидравлического пресса: 1-верхняя подвижная пробка, 2-верхняя плита, 3-двухслойная камера высокого давления, 4-катушка манганинового манометра, 5-измерительная ячейка, 6-уплотнения, 7-нижняя неподвижная пробка, 8-нижняя плита, 9-колонна; в - 1 - рама (основание ячейки), 2-плоский нагреватель, 3-образец, 4-термопара, 5-электровводы, 6-уплотнения, 7-пробка.

гидростатических условиях (до 15 кбар) и высоких температурах (до 400°C). Камера представляет собой двухслойный цилиндр, запирающийся сверху и снизу двумя уплотненными пробками, скрепленными посредством траверс тремя колоннами.

В экспериментах использовался фазовый вариант метода регулярного режима третьего рода с изучением расходящихся радиальных (для цилиндрических образцов) или плоских (для пластин) температурных волн /2,4/.

В связи с этим разработаны две конструкции ячеек: с линейным нагревателем в центре цилиндрического образца и плоским - в виде пластины между двумя образцами породы (рис.3а, б).

Измерительный комплекс собран, в основном, на базе серийных приборов /2/.

3.Изучение магнитных свойств образцов пород и минералов при различных термобарических режимах осуществляется с помощью комплекса специальной измерительной аппаратуры на установках высокого давления и температуры /I и др./. Выделяются два этапа этих исследований.

Первый - изучение магнитных параметров образцов при нормальных условиях, а также создание необходимого магнитного состояния породы, соответствующего режиму эксперимента. Второй - исследование магнитных свойств указанных проб в условиях высоких Р и Т. Помимо традиционных магнитных характеристик ( $\chi$ ,  $\mathcal{J}_n$ ,  $\mathcal{J}_{\alpha s}$  и др.) особое внимание уделяется изучению коэрцитивной силы и температуры Кюри ферромагнитных минералов.

Опыты первого этапа включают исследования, выполняемые на установках для размагничивания переменными и постоянными



магнитными полями остаточных намагниченностей пород различной физической природы, а также получение кривых намагничивания, изучения гистерезисных циклов и спектров микрокоэрцитивных сил. Второй этап предусматривает осуществление экспериментов по изучению магнитных характеристик в условиях гидростатического давления до 300 МПа, выявлению необратимых изменений остаточной намагниченности при 500 и 1500 МПа и исследование температурных зависимостей коэрцитивной силы, магнитной восприимчивости и остаточной намагниченности насыщения.

4. Электрические параметры минерального вещества в различных термодинамических условиях исследовались нами при температурах до 1000°C (в диапазоне частот 20 Гц - 200 кГц) в режимах гидростатического давления до 15 кбар, а также при одновременном воздействии квазигидростатического давления (до 20 кбар) и температуры, достигающей 650°C. Разработанные методики экспериментов используются для изучения температурно-временных и температурно-частотных зависимостей, изобарических и изотермических опытов, исследования изменений электрического сопротивления ( $\rho$ ) и диэлектрической проницаемости ( $\epsilon$ ) пород в зависимости от РТ условий, соответствующих различным глубинам. Имеющиеся в Отделе камеры высокого давления позволяют в условиях высоких температур изучать сухие и влагонасыщенные образцы.

Установка для исследований температурно-частотных зависимостей  $\rho$  и  $\epsilon$  состоит из двух основных блоков: нагревательного и измерительного. Первый - печь, термопара с милливольтметром, амперметр и трансформатор. Второй - пульт управления, тераомметр, измеритель емкостей и мост Соти. Подобная установка использовалась ранее Э.И. Пархоменко и др. Помимо температурных и температурно-частотных зависимостей нами предложена методика выполнения на этой установке температурно-временных опытов.

Исследования электрических свойств пород при одновременном воздействии высокого квазигидростатического давления и температуры выполняются на установке, которая состоит из блоков высокого давления и температуры и измерительного.



Аналогичного типа аппаратура впервые была создана Э.И.Пархоменко и А.Т.Бондаренко. Нами на подобной установке, кроме изобарических и изотермических исследований, проводятся временные опыты, а также эксперименты по модельным термобарическим программам, позволяющим исследовать глубинные изменения электрического сопротивления минерального вещества /6/.

Аппаратура изучения электрических параметров пород в условиях высокого гидростатического давления (до 15 кбар) представлена также барическим и измерительным блоками. Она создана на базе универсальной лабораторной установки гидростатического давления /1/. Первый блок представлен двумя насосными станциями НСВД-2500, служащими для создания предварительного и низкого давления, мультипликатором и тремя манометрами. Второй состоит из измерительных приборов и ячейки. Последняя размещается в камере высокого давления и представляет собой плоский конденсатор с образцом между электродами. Шунтирующее сопротивление электровводов ( $6 \cdot 10^{-11} \text{ Ом}$ ) в используемой камере достаточно большое. Оно позволяет проводить измерения  $\rho$  образцов в условиях высоких  $P$  без введения дополнительных поправок. Рост давления вызывает незначительное его уменьшение. В связи с существенным увеличением емкости электровводов при повышении гидростатического давления вводится соответствующая поправка /7/.

## Л и т е р а т у р а

1. Исследования физических свойств минерального вещества Земли при высоких термодинамических параметрах. "Наукова думка", Киев, 1977, 220 с.

2. Лебедев Т.С., Шаповал В.И., Правдивый А.А. – Теплофизические измерения минерального вещества при высоких давлениях и температурах. Геофизический журнал, т. I, №2, 1979, стр. 17-26.

3. Лебедев Т.С. и др. Упругие свойства горных пород при высоких давлениях. "Наукова думка", Киев, 1972, 184 с.



4. Lebedev T.S., Shapoval V.I. and Pravdivy A.A. Thermal properties of the lithospheric mineral matter under high pressure and temperature. - Geothermics and geothermal energy, eds. V.Čermak and R. Haenel, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 1982, p. 133-139.

5. Physical Properties of Rocks and Minerals under Extreme p, T-conditions. Akademie-Verlag, Berlin, 1979, 233 p.

6. Лебедев Т.С., Шепель С.И. - Электрические свойства пород повышенной проводимости в глубинных термодинамических условиях. Геофизический журнал, т.4, № I, 1982, стр.17-23.

7. Лебедев Т.С., Шаповал В.И., Шепель С.И. - Влияние высокого гидростатического давления на электрические свойства некоторых пород Ущ. Геофизический сборник АН УССР, "Наукова думка", Киев, 75, 1977, стр.45-55.

INSTRUMENT AND METHOD DEVELOPMENT ASSOCIATED WITH P-T  
STUDIES OF MINERAL MATTER PHYSICAL PROPERTIES

T.S. Lebedev, V.I. Shapoval, B. Ya. Savenko, V.A. Korchin,  
S.I. Shepel, V.T. Vasilyaka, A.A. Pravdivy

S.I. Subbotin Institute of Geophysics Ac. Sci. Ukr. SSR  
USSR, 252180, Kiev-180, GSP, prosp. Palladin, 32

The paper reviews the development of some high P-T apparatus used for long time in experimental studies of mineral matter physical properties at high P-T in the Earth's substance physical properties department of the Institute of Geophysics Ac. Sci. Ukr. SSR (Kiev). The main principles of some methods used in studying elastic, thermal, magnetic and electric characteristics of rocks and minerals under various P-T conditions are elucidated.



# ТЕРМОБАРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ СВОЙСТВ НЕКОТОРЫХ ПОРОД

Т.С. Лебедев, В.И. Шаповал, А.А. Правдивый

Институт геофизики им.С.И.Субботина АН УССР  
СССР, 252180, Киев-180, ГСП, просп.Палладина, 32

Существенная роль в изучении физики земных недр принадлежит лабораторным исследованиям тепловых свойств минерального вещества в различных модельных РТ условиях.

В Отделе физических свойств вещества Земли Института геофизики им.С.И.Субботина АН УССР (Киев) созданы специализированные установки и аппаратура, а также разработана методика экспериментальных исследований тепловых характеристик пород и минералов в условиях высоких температур (до  $400^{\circ}\text{C}$ ), гидростатического давления (до 15 кбар), а также при одновременном их воздействии ( $P < 6$  кбар,  $T < 400^{\circ}\text{C}$ )/1,2/.

Наши температурные опыты на образцах гранитов, мигматитов и гнейсов показали, что повышение температуры до  $50^{\circ}\text{C}$  приводит к уменьшению их теплопроводности ( $\alpha$ ) за счет разогрева проб и увеличения фононного рассеяния. При изменении температуры в интервале  $50-200^{\circ}\text{C}$  происходит увеличение  $\alpha$  благодаря улучшению тепловых контактов между зернами минералов, а также возникновению дополнительного конвективного теплопереноса. Дальнейший рост температуры до  $350^{\circ}\text{C}$  приводит к уменьшению теплопроводности преимущественно вследствие повышения фононного эффекта (рис.1).

Барические опыты на пробах гранитов и гнейсов позволили установить возрастание температуропроводности при увеличении давления до 3 кбар. Это обусловлено уменьшением пористости и трещиноватости пород. В интервале 3-6 кбар частично прекращается их уплотнение при сохранении достаточно высоких тепловых контактов. Изменение температуропроводности стабилизируется. Кроме того, при указанных давлениях в некоторых гнейсах и гранитах характерно возникновение участков значительных напряжений на границах зерен. Последнее приводит к увеличению фононного рассеяния и уменьшению температуропроводности. При возрастании давления до 10 кбар наблюдается частичное изменение структуры пород и снятие



локальных напряжений на границах зерен. Эти явления обуславливают повышение коэффициента температуропроводности на 5-10% (рис.2).

Модельные эксперименты при одновременном воздействии давления и температуры, выполненные по региональным РТ программам, позволили выявить ряд интересных закономерностей. В верхних горизонтах коры (до 5 км) предполагается увеличение теплопроводности, теплоемкости и температуропроводности в связи с преобладающим влиянием давления. Здесь, в основном, происходит уплотнение минерального вещества под воздействием последнего. На глубинах более 5 км теплоемкость изученных нами пород практически не изменяется. Изменение же теплопроводности довольно сложное и зависит, по-видимому, от особенностей распределения давления и температуры. Наблюдаются породы, для которых после некоторого уменьшения (на глубинах 5-10 км) отмечается дальнейший рост этого параметра (вплоть до 20 км). Температуропроводность минерального вещества коры в интервале 3-7 км интенсивно падает, а затем (почти до 20 км) практически не изменяется (рис.3).

Следовательно, изменения теплофизических свойств пород при различных РТ режимах опытов являются сложными функциями давления, температуры, структуры, пористости и ряда других факторов. Они зависят также от характера термических контактов между зернами породообразующих минералов, их размеров и тепловых параметров.

#### Литература

1. Т.С. Лебедев, В.И. Шаповал, А.А. Правдивый. Теплофизические измерения минерального вещества при высоких давлениях и температурах. Геофизический журнал АН УССР, Киев, 1979, №2, т. I, стр. 17-26.

2. T.S. Lebedev, V.I. Shapoval and A.A. Pravdivy. Thermal properties of the lithospheric mineral matter under high pressure and temperature. - Geothermics and geothermal energy, eds. V. Čermak and R. Haenel, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 1982, p. 133-139.



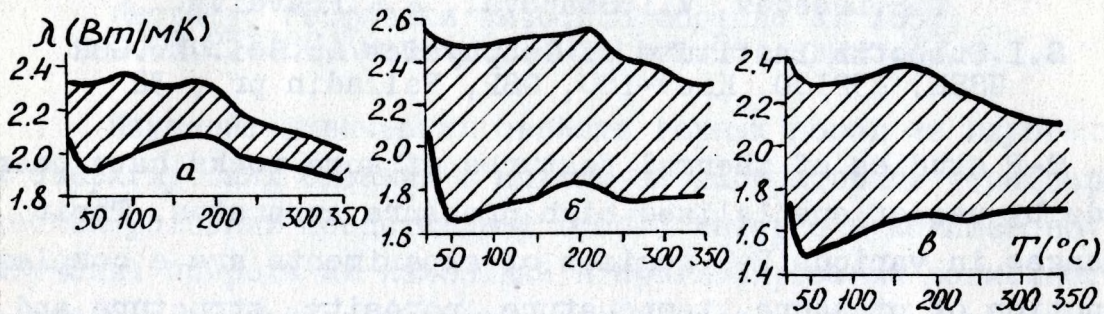


Рис. 1. Зависимость теплопроводности пород от температуры: а - граниты (8 обр.), б - мигматиты (10 обр.), в - гнейсы (9 обр.).

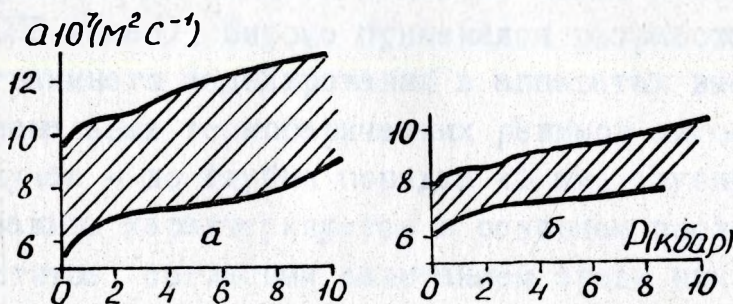


Рис. 2. Изменение температуропроводности пород от давления: а - граниты (9 обр.), б - гнейсы (8 обр.).

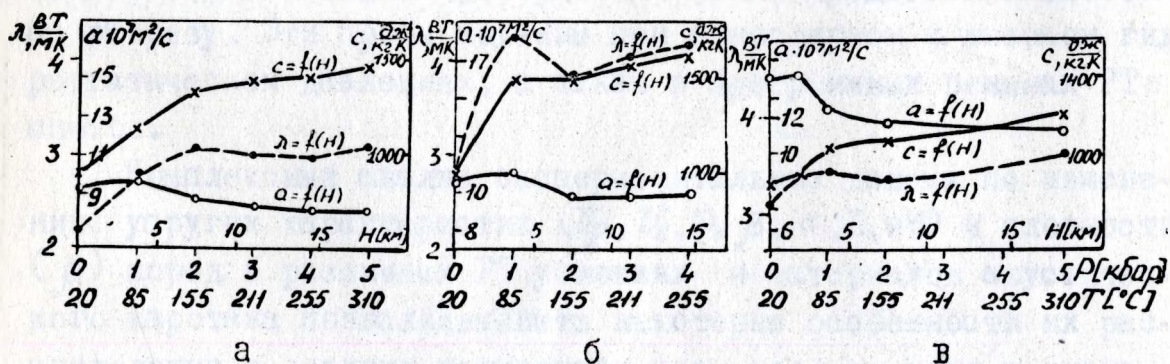


Рис. 3. Тепловые свойства некоторых пород в модельных РТ условиях опытов: а - гранит, б - чарнокит, в - кварцит.



## T-P STUDIES OF THERMAL FEATURES OF SOME ROCKS

T.S.Lebedev, V.I.Shapoval, A.A.Pravdivy

S.I.Subbotin Institute of Geophysics Ac.Sci.Ukr.SSR  
USSR, 252180, Kiev-I80, GSP, Palladin pr., 32

T-P studies of thermal features of some rocks have been made by use of specialized high pressure apparatus. Their changes in various P-T regimes of experiments are a complex function of pressure, temperature, porosity, structure and some other factors. The thermal parameters also depend on the character of thermal contacts of grains of some rock forming minerals, their size and features.



# МОДЕЛЬ УПРУГОГО СОСТОЯНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО ВЕЩЕСТВА ЛИТОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ ЛАБОРАТОРНЫХ РТ ОПЫТОВ

Т.С.Лебедев, В.А.Корчин, П.А.Буртный

Институт геофизики им.С.И.Субботина АН УССР  
СССР, 252180, Киев-180, ГСП, просп.Палладина, 32

Изучение физических свойств горных пород из глубоких и сверхглубоких скважин в модельных лабораторных термобарических условиях представляет особый интерес в комплексном изучении природы их изменений и прогнозировании возможного состава и состояния минерального вещества на глубинах, не вскрытых скважинами. В связи с этим были исследованы в различных РТ режимах опытов упругие характеристики пород, вскрытых глубокой скважиной на Украинском щите (УШ). Эксперименты выполнялись по методикам и на установках, разработанных в Отделе физических свойств вещества Земли Института геофизики АН УССР (Киев). Широко применялся разработанный нами метод программного моделирования в аппаратах высокого давления региональных термобарических режимов литосферы, в конкретном случае – до глубин порядка 25 км. Глубинное строение района скважины характеризуется в основном послойным развитием мигматитов, согласным залеганием среди них тел гранитов и останцами негранитизированных биотитовых гнейсов. По всему разрезу скважины (до 3500 м) встречены маломощные прослойки мелко-и среднезернистых и гнейсовидных гранитов, более редко – дайки пикритовых порфиритов и диабазов. Для опытов отбирались образцы керна всех указанных пород в количественном отношении пропорционально их представительности по разрезу. Эти пробы изучены при атмосферном и высоком гидростатическом давлениях, а также в программных режимах РТ опытов.

Комплексный анализ экспериментальных данных по изменению упругих характеристик ( $U_p$ ,  $U_s$ ,  $\varphi$ ,  $\beta$ ,  $\sigma$ ,  $E$ , и  $\nu$ ) и плотности ( $\rho$ ) пород в различных РТ условиях и материалов акустического каротажа позволил выявить некоторые особенности их распределения в верхних горизонтах коры исследуемого региона. Выявленная зональность в изменении упругих параметров ино-



гда носит лишь вещественный характер, в других случаях — вещественно-структурный. Ряд же областей обусловлен наложением на гидростатические условия неоднородных полей напряжений.

На основании материалов РТ опытов нами предлагается модель упругого состояния минерального вещества земной коры района скважины на глубинах вплоть до 25 км.

Приняв, что в коре на глубинах более 5–6 км распространены породы (в том числе их отдельные крупные блоки), различающиеся по минеральному составу примерно на 10–15% и близкие по своему генезису, то результаты экспериментов позволяют предположить наличие участков аномальных изменений упругих характеристик. Чаще всего — это зоны пониженных или повышенных значений скоростей распространения упругих волн. Природа их по видимому термодинамическая — результат эффекта противоположного воздействию давления и температуры на физико-механическое состояние пород. Участки повышенных скоростей, а также  $\dot{E}$ ,  $\dot{U}$  и  $\dot{K}$ , вероятно обусловлены преобладающей ролью давления, а пониженных — температуры. Поскольку минеральное вещество характеризуется сложной структурой, многокомпонентностью и неравномерным распределением внутренних остаточных напряжений, накопление упругой энергии до критической и последующая релаксация напряжений в виде микроразрушений пород в локальных участках могут повторяться с некоторой периодичностью. Экспериментально нами показано, что чередование этих зон зависит от состояния вещества и региональных градиентов изменений температуры и давления с глубиной. В частности, для района скважины наиболее вероятно наличие таких зон в двух интервалах РТ, соответствующих глубинам 7–12 км (первых), где по видимому залегают пачки крупнозернистых гранитов и мигматитов, а также отдельные блоки гнейсов. Во втором интервале (16–22 км) зоны пониженных скоростей вероятно связаны с наличием мелкозернистых гранитов, гнейсовидных пород и дайковых образований. Результаты опытов по образцам из этой скважины, а также из других районов УЦ, позволяют предполагать термодинамическую природу зон пониженных скоростей на глубинах 6–25 км в том числе выделяемых здесь методом взрывной сейсмологии. Породам этих



зон присуще уменьшение упругости, плотности, повышенная хрупкость вблизи их границ, более высокая пластичность в центральных частях. Наряду с зонами пониженных скоростей термодинамического происхождения, таковые могут быть обусловлены значительными изменениями минерального состава. Однако, влияние определенных соотношений давления и температуры на соответствующих глубинах вносит ряд корректив в их положение, размеры, интенсивность и контрастность.

### Литература

Т.С.Лебедев, Б.В.Половинкин, В.А.Корчин, П.А.Буртный, В.И.Шевченко, В.А.Крюченко – Упругие свойства пород из глубокой скважины центральной части Украинского щита и закономерности их изменений в различных термобарических условиях земной коры. Геофизический журнал АН УССР, Киев, №4, том V, 1983.

#### A MODEL OF THE MINERAL MATTER ELASTIC STATE OF THE LITHOSPHERE BY LABORATORY P-T DATA

T.S.Lebedev, V.A.Korchin, P.A.Burtny

S.I.Subbotin Institute of Geophysics Ac.Sci.Ukr.SSR  
USSR, 252180, Kiev-180, GSP, Palladin pr., 32

A mineral matter elastic state model for the central part of the Ukrainian Shield under P-T conditions corresponding with depths to 25 km is proposed. For its construction laboratory data obtained in programmed P-T conditions of studies of elastic characteristics of core samples of one of the first deep (to 3500 m) boreholes of this region have been widely used. In the interval of 5-25 km zones of elastic wave low velocities caused thermodynamically are likely to exist. Some seismic discontinuities at different depths associated with mineral content variation are believed to be more pronounced at definite real P-T ratios.



# ОСТАТОЧНАЯ НАМАГНИЧЕННОСТЬ МИНЕРАЛЬНОГО ВЕЩЕСТВА В ГЛУБИННЫХ ЗОНАХ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Т.С.Лебедев, Б.Я.Савенко

Институт геофизики им.С.И.Субботина АН УССР  
СССР, 252180, Киев-180, ГСП, просп.Палладина, 32

Минеральное вещество земной коры находится под воздействием различного типа нагрузок. Существенная роль в изменении физических (в том числе магнитных) свойств пород принадлежит литостатическому давлению, которое распределяется с глубиной по определенным законам. Его аналогом в практике лабораторных экспериментов является гидростатическое давление.

Результаты выполненных в Отделе физических свойств вещества Земли Института геофизики АН УССР (Киев) исследований изменений с глубиной (Н) остаточной намагниченности насыщения ( $J_{zs}$ ) кристаллических пород ряда геологических регионов Украины, на основании опытов при высоком гидростатическом давлении (Р), приведены в таблице:

Породы, регионы	Степень сохранности $J_{zs}$ (Р) в % на различных глубинах (км)				
	2	4	6	8	10
Породы кристаллического фундамента Днепровско-Донецкой впадины	$\frac{95-70}{\sim 82}$	$\frac{95-60}{\sim 78}$	$\frac{90-50}{70}$	$\frac{85-45}{65}$	$\frac{80-35}{\sim 57}$
Эрфузивные породы Днепровско-Донецкой впадины	$\frac{90-65}{82}$	$\frac{90-50}{70}$	$\frac{85-45}{65}$	$\frac{80-35}{57}$	$\frac{75-25}{50}$
Интрузивные породы Украинского щита	$\frac{95-75}{85}$	$\frac{95-65}{80}$	$\frac{95-45}{70}$	$\frac{95-30}{62}$	$\frac{95-15}{55}$
Эрфузивные породы Украинского щита	$\frac{95-80}{87}$	$\frac{95-40}{67}$	$\frac{90-35}{62}$	$\frac{85-30}{57}$	$\frac{85-25}{55}$
Метаморфические породы Криворожья	$\frac{95-80}{87}$	$\frac{90-50}{70}$	$\frac{80-40}{60}$	$\frac{70-30}{50}$	$\frac{65-30}{47}$
Интрузивные породы Горного Крыма	$\frac{93-70}{82}$	$\frac{85-55}{65}$	$\frac{80-45}{62}$	$\frac{80-40}{60}$	$\frac{75-40}{57}$
Вулканогенные образования Закарпатья	$\frac{98-75}{88}$	$\frac{95-60}{77}$	$\frac{90-50}{70}$	$\frac{90-40}{65}$	$\frac{90-30}{60}$

Примечание: в числителе - минимальные и максимальные изменения  $J_{zs}$  (Н), %; в знаменателе - средние по экстремальным значениям.



Анализ результатов опытов показывает, что все типы изученных пород характеризуются уменьшением величины остаточной намагниченности. При максимальном давлении 250 МПа, соответствующем глубинам порядка 10 км, порода может сохранить 47–60% первоначальной намагниченности без учета влияния температуры (Т). Несмотря на близость интервалов и характера изменений  $J_{rs}$  (Н) наблюдаются существенные отличия указанных значений. Они особенно проявляются при сравнении состава, структурных и генетических особенностей ферримагнитных минералов этих пород.

Основными факторами, определяющими устойчивость  $J_{rs}$  (Р), являются термодинамические условия формирования породы. Образование ферримагнитных минералов происходит в различных РТ обстановках. Поэтому они отличаются типоморфными особенностями, проявляющимися в размерах и внутренней структуре зерен, наличии включений и изоморфных примесей. Это обуславливает широкие пределы устойчивости их намагниченности к воздействию давления. Стабильность  $J_{rs}$  (Р) в значительной мере определяется также уровнем метасоматической переработки породы, развитием низко- и высокотемпературного окисления ферримагнитных минералов, сохранностью ее до опытов. Особое значение последнего фактора надо учитывать при экстраполяции на большие глубины результатов экспериментального изучения  $J_{rs}$  (Р).

Магнитосодержащие породы Украинского щита при гидростатическом давлении 500–800 МПа (глубины порядка 20–30 км) сохраняют в среднем 20–30% своей намагниченности. По данным наших исследований эти глубины являются нижней границей воздействия давления на остаточную намагниченность. Температура здесь достигает 200–300<sup>0</sup>С и с ее повышением разрушение намагниченности будет обусловлено преобладающим влиянием температуры. Магнетит является довольно устойчивым минералом и поэтому стабильность  $J_{rs}$  (Р) будет определяться РТ условиями его образования.

Горные породы, содержащие в составе минералы титаномагнетитового ряда, даже при давлениях 1500 МПа сохраняют в среднем 42% первоначальной  $J_{rs}$ . Отмечается широкий диапазон изменений  $J_{rs}$  при различном давлении. Причиной такого



явления нам представляется различие в сохранности указанных минералов к моменту исследований. Устойчивость остаточной намагниченности этих минеральных ассоциаций в значительной мере должна определяться температурой гомогенизации и распада твердых растворов титаномагнетитов. Она может быть различна в зависимости от типа минерала, геологической и термодинамической обстановки его образования.

Все это указывает на тесную связь изменений с глубиной остаточной намагниченности насыщения изученных пород с их генетическими особенностями.

#### MINERAL MATTER REMANENT MAGNETIZATION IN DEEP CRUSTAL ZONES

T.S.Lebedev, B.Y.Savenko

S.I.Subbotin Institute of Geophysics Ac.Sci.Ukr.SSR,  
USSR, 252180, Kiev-180, GSP, Palladin pr., 32

Results of laboratory studies of changes in remanent saturation magnetization of some crystalline rocks of several regions of the Ukraine under high hydrostatic pressure are considered. It has been found that the degree of change in remanent magnetization with depth is largely defined by P-T conditions of mineral matter formation.



МАКРОПОЛЯРНАЯ ТЕОРИЯ ДЕФОРМАЦИИ ГОРНЫХ ПОРОД.  
 ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ РЕЛАКСАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ.

За последние двадцать пять лет систематическими экспериментальными исследованиями механизма деформации горных пород в условиях негидростатического напряженного состояния установлено, что процесс деформации сопровождается переориентацией зерен породообразующих минералов. Причем, процесс переориентации успешно конкурирует в энергетическом смысле с дислокационными процессами в таких горных породах, как известняк и мрамор ( *Tuznez, Weiss* и др.). Пластифицирующее свойство температуры способствует развитию процесса переориентации зерен в изверженных и метаморфических породах.

Экспериментальный материал дает основание для развития теории деформации горных пород как зернистых макронеоднородных сред. Идеальным природным аналогом такой среды могут служить песчаники с высоким содержанием  $\alpha$  - кварца в виде хорошо окатанных сферических зерен, скрепленных "вязким" цементом. Структурным элементом такой среды является сферическое зерно радиуса  $r_0$ , обладающее упругой анизотропией  $S_{ijkl}$  и окруженное вязким материалом цементирующего вещества толщиной  $\alpha = r_1 - r_0$ . В условиях однородного поля напряжений  $\delta_{11}$  зерно стремится занять положение устойчивого равновесия соответствующее  $\max$  упругой энергии Гельмгольца (использованы термодинамические концепции Соболева, *MacDonald* ).

Уравнение движения структурного элемента макрополярной среды (СЭМС) записывается в виде затухающего во времени процесса

$$\alpha_1(\beta) \ddot{\psi} + \alpha_2(r, r_0, r_1) \dot{\psi} + \alpha_3(\Delta F, \varphi_0) \psi = 0, \quad (I)$$

где  $\psi, \varphi_0, \beta, r, \Delta F$  - текущий угол поворота кристалла в лабораторной системе координат, исходный угол ориентации фиксированного кристаллографического направления, полярный момент инерции, вязкость межзерновой границы, приращение



упругой энергии Гельмгольца.

Вязкость в уравнение движения СЭМС вводится в виде  $\eta = \eta_0 \exp(U_0/RT)$ , где  $U_0$  - энергия активации,  $R$  - универсальная газовая постоянная,  $T$  - абсолютная температура.

Пренебрегая инерционным членом в уравнении движения получено выражение для угла переориентации кристалла в виде

$$\psi(t) = \psi_0 \exp \left[ - \frac{\Delta S_{11} \delta_{11}^2(0)}{6\eta_0 \exp(U_0/RT)} t \right]. \quad (2)$$

Затем, осуществлен переход к полидисперсной среде и коллективной реакции зерен такого материала на внешнее воздействие

$$\varepsilon(t) = S_{11}^T(0) \delta_{11}(0) + \Delta S_{11}^T(t) \delta_{11}(0). \quad (3)$$

При хаотической ориентации кристаллографических осей до приложения нагрузки податливости материала есть

$$S_{ij}^T(0) = \langle S_{ijkl} \rangle = \frac{1}{8\pi} \int_0^\pi \int_0^\pi \int_0^{2\pi} f(\theta, \varphi, \psi) s'_{ijkl} d\theta d\varphi d\psi, \quad (4)$$

где  $\theta, \varphi, \psi$  - углы Эйлера. Используя уравнение неразрывности, получено выражение для текстурной функции  $f(\theta, \varphi, \psi)$ , как функции угловой скорости переориентации зерен.

Модель распространена на описание состояния макрополярных сред (упруго-вязких, упруго-пластичных, упруго-вязкопластичных) в условиях сложно-напряженного состояния.

Экспериментально исследован процесс релаксации напряжений в образцах песчаников в диапазоне температур до  $800^\circ\text{K}$ . С этой целью использована универсальная испытательная машина УМЭ-ЮТМ с механическим приводом и температурной камерой до  $1500^\circ\text{K}$ .

На рис. 1 представлены кривые релаксации напряжений и в образцах песчаников при реализации осевой деформации сжатия при температурах  $293^\circ\text{K}$ ,  $660^\circ\text{K}$  и  $773^\circ\text{K}$ .



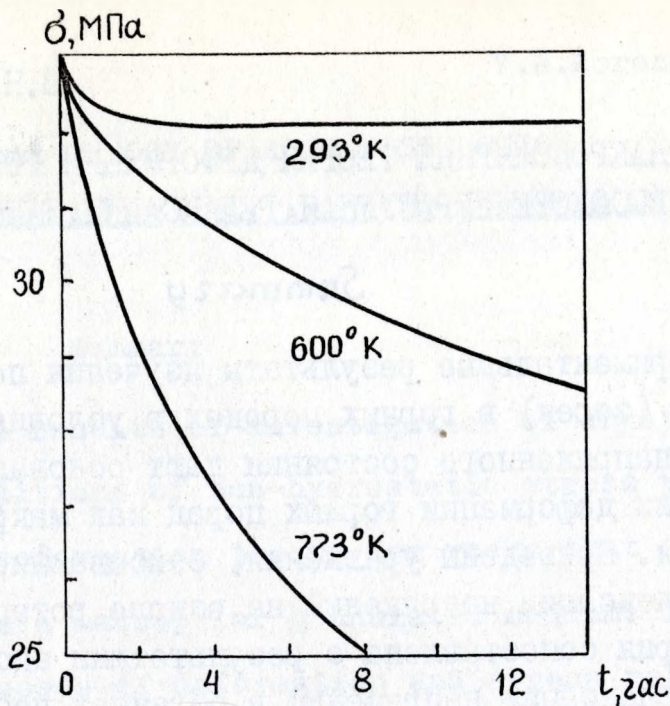


Рис. I. Релаксация напряжений в образцах песчаника

По аналогии с уравнением (3) уравнение релаксации напряжений имеет вид

$$\sigma_{11}(t) = C_{11}^T(0) \varepsilon_{11}(0) - \Delta C_{11}^T(t) \varepsilon_{11}(0) \quad (5)$$

где  $C_{11}^T$  — осевая упругость материала.

В рамках модели "вязкого" сопротивления материала цемента, препятствующего переориентации зерен, получены значения вязкости межзерновых границ  $5 \cdot 10^5$  пуаз при  $T=293^\circ\text{K}$  и порядка  $10^4$ – $10^3$  пуаз при температуре  $773^\circ\text{K}$ .

Низкая вязкость межзерновых границ в горных породах, активируемая температурой земной коры, по-видимому, может обеспечить механизм быстрых (сутки, месяцы) изменений напряженно-деформированного состояния массива в сейсмоактивных районах. Применимость развиваемой теории с количественной точки зрения показана при оценке изменения отношения скоростей распространения продольных поперечных волн ( $V_P/V_S$ ) в очаговых зонах тектонических землетресений.

Московский горный  
институт



МАКРОПОЛЯРНАЯ ТЕОРИЯ ДЕФОРМАЦИИ ГОРНЫХ ПОРОД.  
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ РЕЛАКСАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ.

Summary

Экспериментальные результаты изучения переориентации кристаллов (зерен) в горных породах в условиях негидростатического напряженного состояния дают основание для разработки теории деформации горных пород как макрополярных зернистых сред. Приведены уравнения, описывающие процесс деформации и релаксации напряжений на основе ротационных эффектов зерен. Теория сопоставлена с результатами экспериментального изучения релаксации напряжений в образцах песчаников в диапазоне температур до  $773^{\circ}\text{K}$ . Низкая вязкость межзерновых границ  $10^5$ – $10^6$  пуаз, по-видимому, может объяснить механизм быстрых изменений напряженно-деформированного состояния массивов горных пород в сейсмоактивных районах.



## MACROPOLAR THEORY OF ROCK DESTRUCTION.

## HIGH TEMPERATURE RELAXATION OF STRESSES.

## Summary

Experimental results of investigation of crystals (grains) in rocks in conditions of non-hydrostatic stress permit us to develop the deformation theory for rocks that are considered to be a macropolar granulated medium. The equations describing processes of deformation and stress relaxation are based on rotational grain effects. The theory is compared to the results of experimental study of stress relaxation in sandstone samples within temperature range up to 773 K. Low viscosity of grain interfaces  $10^5 - 10^6$  poise may probably explain the mechanism of quick changes of stress-deformation condition of rock masses in regions with intrinsic increased seismic activity.



# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРАНИТОИДОВ В РАЗЛИЧНЫХ РТ УСЛОВИЯХ

Т.С.Лебедев,С.И.Шепель

Институт геофизики им.С.И.Субботина АН УССР  
СССР,252180,Киев-180,ГСП,просп.Палладина,32

Гранитоиды распространены в земной коре достаточно широко. Поэтому изучение природы и геолого-геофизического аспекта изменений их физических свойств является задачей весьма интересной и важной. В Отделе физических свойств вещества Земли Института геофизики АН УССР (Киев) исследованы электрическое сопротивление ( $\rho$ ), диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon$ ), энергия активации ( $E_0$ ) и предэкспоненциальный коэффициент ( $\rho_0$ ) некоторых гранитоидов Украинского щита в опытах при высоких квазигидростатическом давлении ( $P$ ) и температуре ( $T$ )/1,2 и др./ . Изученная коллекция представлена собственно гранитами (а также порфировидными, пегматоидными, рапакиви и гнейсовидными разновидностями), гранодиоритами и мигматитами. Анализ результатов опытов позволил установить, что максимальным электрическим сопротивлением обладают собственно граниты. Среди них выделяются две группы: образцы, отобранные на поверхности, и пробы керна глубокой скважины (3500 м). Среднее значение электрического сопротивления при комнатной температуре ( $\rho_{T=20^{\circ}\text{C}}$ ) сухих гранитов из скважины составляет  $5,0 \cdot 10^{10}$  Ом.м, а отобранных на поверхности -  $10^{10}$  Ом.м. Порфировидные граниты характеризуются более низкими значениями электрического сопротивления ( $\bar{\rho}_{T=20} = 8,7 \cdot 10^9$  Ом.м). Гнейсовидным гранитам, гранодиоритам и мигматитам присуще при комнатной температуре еще меньшее  $\rho$  (соответственно  $6,9$ ;  $5,0$  и  $4,8 \cdot 10^9$  Ом.м). Самыми низкими величинами электрического сопротивления обладают рапакиви ( $\bar{\rho}_{T=20^{\circ}\text{C}} = 6,0 \cdot 10^7$  Ом.м), примерно на 2,5 порядка меньше по сравнению с собственно гранитами. Это, повидимому, связано с их структурными особенностями.

Температурные кривые электрического сопротивления исследованных типов пород (рис.а,б) характеризуются наличием областей температур с очень низкой энергией активации в



интервале от комнатной до 100–300°C. В этом диапазоне температур исследовались сухие образцы, предварительно высушенные в течении 7–8 часов при 105–110°C и затем охлажденные в эксикаторе до комнатной. Средние значения энергии активации ( $E_{00}$ ) для всех исследованных пород при этом составляют 0,19–0,28 эв. Такие низкие ее значения свидетельствуют, что их электропроводность в значительной степени определяется таковой ионов железа.

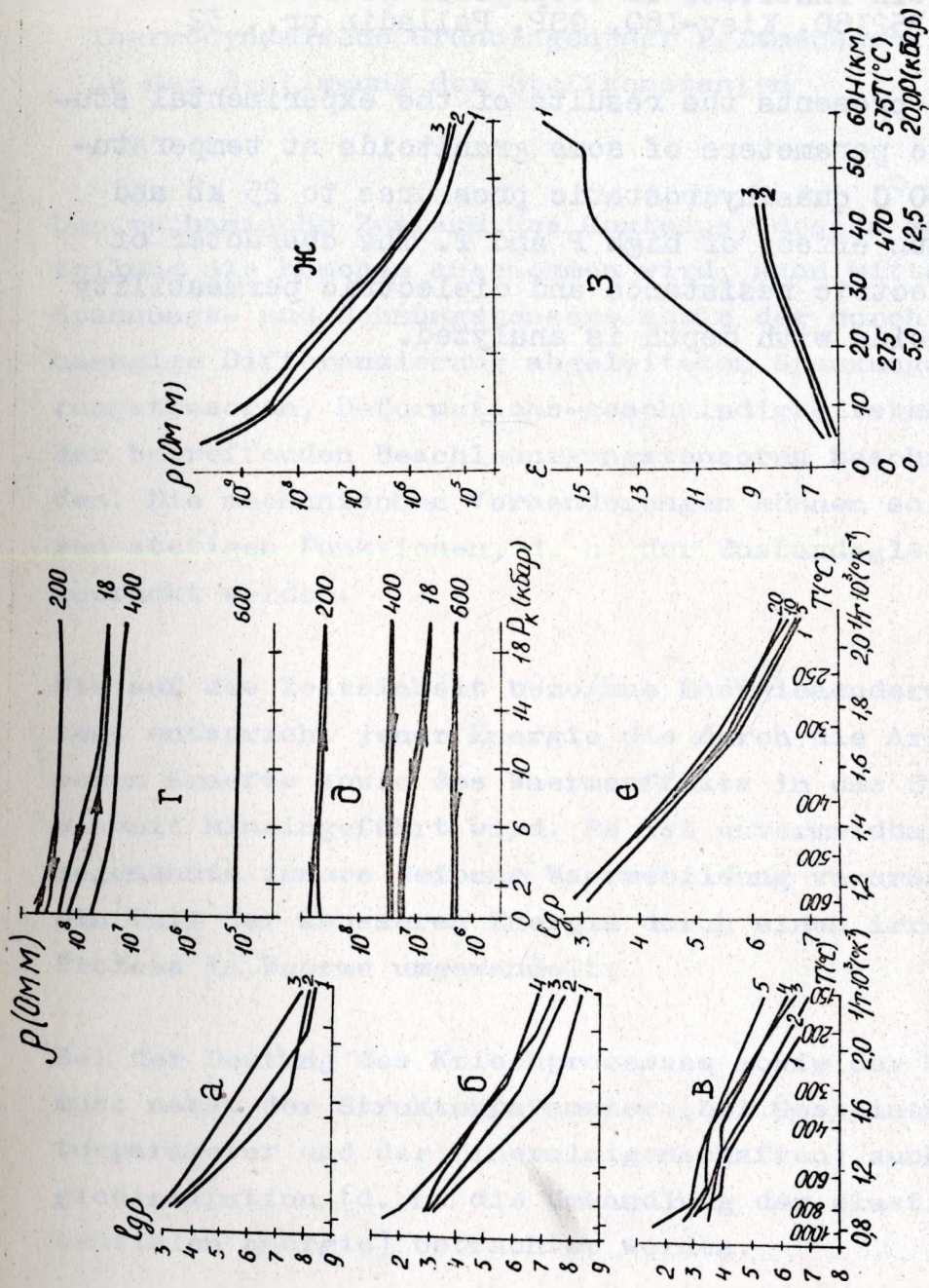
В пределах более высоких температур (от 150–300 до 700–800°C) (рис.в) наблюдаются большие значения  $E_{0I}$ . Минимальные величины энергии активации в этой области  $T$  присущи мигматитам ( $E_{0I}=0,64$  эв) и рапакиви ( $E_{0I}=0,54$  эв), самые высокие – порфировидным гранитам ( $E_{0I}=0,76$ ). Зона собственной проводимости ( $T > 700–800°C$ ) обладает максимальными величинами энергии активации. Диэлектрическая проницаемость с ростом температуры растет с разной интенсивностью для различных пород. Увеличение квазигидростатического давления до 20 кбар обуславливает уменьшение или практическую неизменность  $\rho$  гранитоидов комнатной влажности и сухих (рис.г,д). В исследованных гранитоидах не установлено четкой тенденции изменений  $E_0$  и  $\rho_0$  при возрастании давления в указанном диапазоне. В большинстве случаев наблюдается незначительное уменьшение энергии активации, а иногда отмечается увеличение  $E_0$  (рис.е). Градиенты уменьшения электрического сопротивления гранитоидов характеризуются большими значениями до 45–50 км, чем глубже (рис.ж). Диэлектрическая проницаемость гранитоидов с глубиной увеличивается (рис.з).

#### Литература

1. Т.С.Лебедев, Э.И.Пархоменко, С.И.Шепель – Температурные изменения электрических свойств пород щелочных массивов приазовской части Ур. Геофизический сборник АН УССР, Киев, вып. 71, 1976, с. 63–70.

2. Т.С.Лебедев, С.И.Шепель – Электрические свойства пород повышенной проводимости в глубинных термодинамических условиях. Геофизический журнал АН УССР, К., №6, т. II, 1980, с. 54–68.





Зависимости  $\rho = f(T, P)$ ,  $\rho = f(P, T) = f(H)$  и  $\epsilon = f(P, T) = f(H)$ .

а) 1, 2 - граниты, 3 - гранодиорит; б) 1, 3 - мигматиты, 2, 4 - граниты порфировидные;  
 в) 1-5 - граниты рапакиви; г) образец мигматита: 18 (при комнатной влажности), 200, 400 и 600 (сухой) - температура (°C); д) образец гранодиорита; е) образец рапакиви: 1, 5, 10, 20 - давление (кбар); ж, з) 1 - мигматит, 2 - гранит, 3 - гранодиорит.



ELECTRIC CHARACTERISTICS OF GRANITIDS  
UNDER VARIOUS P-T CONDITIONS

T.S.Lebedev, S.I.Shepel

S.I.Subbotin Institute of Geophysics Ac.Sci.Ukr.SSR  
USSR, 252180, Kiev-I80, GSP, Palladin pr., 32

The paper presents the results of the experimental study of electric parameters of some granitoids at temperatures up to 1000°C quasihydrostatic pressures to 25 kb and at simultaneous effect of high P and T. The character of changes in electric resistance and dielectric permeability of the granitoids with depth is analyzed.



Gálos, M. - Kertész, P.

Technische Universitaet, Budapest, Ungarn

### Thermodynamische Grundlagen der Felsmechanik in der Bestimmung der Stoffkonstanten

Der mechanische Zustand des Gesteins, dessen Materialverteilung als homogen angenommen wird, kann mittels der Spannungs- und Dehnungstensors sowie der durch zeitabhängige Differenzierung abgeleiteten Spannungsveranderungstensen, Deformations-geschwindigkeitstensen sowie der betreffenden Beschleunigungstensen beschrieben werden. Die mechanischen Veränderungen können so mittels deren stetigen Funktionen, d. h. der Zustandsgleichungen ausgedrückt werden.

Die auf die Zeiteinheit bezogene Energieänderung des Systems entspricht jener Energie die durch die Arbeit der äusseren Kraefte sowie des Waermeeffekts in das System je Zeiteinheit hineingeführt wird. Es ist unvermeidbar, dass die sogenannte innere Reibung Waermebildung verursacht, so wird ein Teil der äusseren Energie durch einen irreversiblen Prozess in Waerme umgewandelt.

Bei der Dautung des Kriechprozesses sowie der Relaxation muss nebst der Strukturparameter (bei Gesteinen der Texturparameter und der Mineraleigenschaften) auch die Energiedissipation (d. h. die Umwandlung der elastischen potentialen Energie) betrachtet werden.



Bei den Ingenieurbauten werden diese Prozesse im Allgemeinen im Bereich ohne Umwandlungen des Materialstrukturs stattfinden. Man muss ihren Temperaturabhängigen Charakter klarlegen, dadurch können sie auch dem physikalischen Inhalt entsprechend im Projektierungsarbeiten der Bemessung und der Strukturgestaltung gebraucht werden.



A kőzetmechanika termodinamikai alapjai az anyag-  
jellemzők meghatározásában

A folytonos anyageloszlásának tekintett kőzet mechanikai állapotát a feszültségi és alakváltozási tenzorral, valamint a belőlük idő szerinti differenciálással levezetett feszültségváltozási- és alakváltozásebesség tenzoraival, ill. gyorsulás tenzorokkal írjuk le. A mechanikai változások így ezek folytonos függvényeivel - azaz az állapotegyenletekkel - fejezhetők ki.

A rendszer időegységre jutó energiaváltozása annak az energiának felel meg, amelyet időegységenként a külső erők munkája és a rendszerbe kívülről bevezetett hőhatás jelent.

A mechanikai folyamatokban nem akadályozható meg, hogy az u.n. belső súrlódás által hő keletkezzen. Így a külső energia részben hővé alakul. Ez a folyamat irreverzibilis. A kúszási és relaxációs folyamat értelmezésénél az anyagszerkezeti jellemzők - kőzeteknél kőzetalkotó és szöveti tulajdonságok - mellett a rugalmas potenciális energia hővé történő átalakulását (diszzipációját) is értelmezni kell.

Mérnöki szerkezeteknél ezek a folyamatok általában az anyagszerkezeti átalakulásoktól mentes tartományban játszódnak le, de hőmérséklettől függő jellegüket értékelni kell, mert így szerepeltethetők csak fizikai tartalmuknak megfelelően a méretezési és szerkezetkialakítási tervezői munkában.



Der Einfluß der geometrischen Form und des Erkaltingsregimes auf den Verlauf der Magnetisation innerhalb einiger geologischer Gebilde.

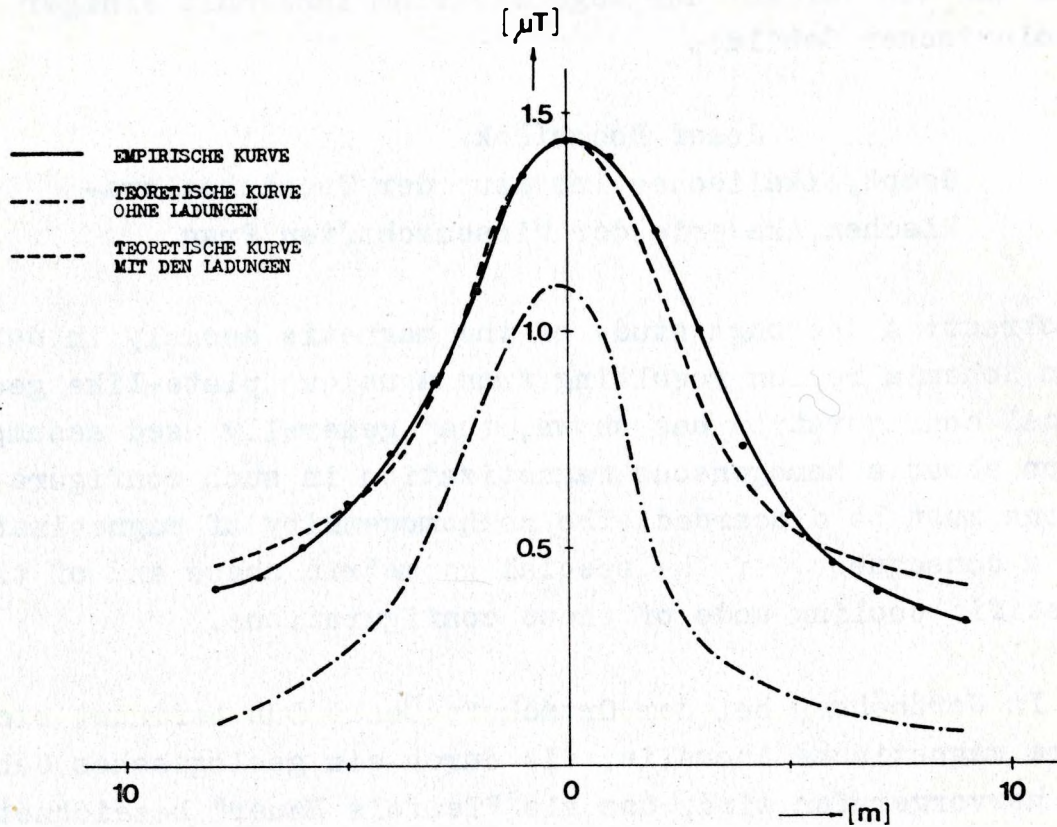
Josef Bochníček

Geophysikalisches Institut der Tschechoslowakischen Akademie der Wissenschaften Prag

Abstract: A thorough study of the magnetic anomaly in northern Bohemia region resulting from a unique plate-like geological configuration has shown, that generally used assumption about a homogeneous magnetization in such configurations must be discarded. The nonhomogeneity of magnetization is a consequence of the special geometric shape and of the specific cooling mode of these configurations.

In Nordböhmen bei der Ortschaft Český Dub befindet sich eine magnetische Anomalie, die durch ein geologisches Gebilde hervorgerufen wird, das als "Teufels Mauer" bezeichnet wird. Dieses einzigartige Gebilde wird durch vulkanisches Gestein gebildet (melilitisches Nephelinit) das sich durch hohe remanente Magnetisation auszeichnet (das Verhältnis zwischen remanenter und induzierter Magnetisation ist  $\sim 30$ ). Dieses Gestein nimmt in dem Raum die Form einer senkrecht geneigten flachen Tafel ein, die etwa 2m stark, einige km lang und von unbekannter Tiefe ist. Die Längswände dieser Tafel schließen mit dem geographischen Meridian den Winkel  $\sim 35^\circ$ . Die Ermittlung der magnetischen Anomalie der z-komponente, die den Gegenstand dieser Arbeit darstellt, wurde an der Horizontallinie quer durch das Gebilde in der Höhe von 3.0m über der Oberfläche der Teufelsmauer durchgeführt. Die Messungsergebnisse sind in graphischer Form auf dem Bild verzeichnet. Aus diesem Bild ist ersichtlich, daß die beiden empirischen Kurven im wesentlichen achsensymmetrisch sind. Die ausschließlich positiven Werte der Anomalie, die auch in der großen Entfernungen von ihrer Mitte festgestellt wurden, deuten eine beträchtliche Tiefe der Tafel an. Die unerwartete Achsensymmetrie der gemessenen Kurven bedeutet, daß der Einfluß der Quermagnetisation vernachlässigt werden kann.





Daraus geht hervor, daß die theoretische Analyse von den ge-  
läufigen Vorstellungen einer homogenen Magnetisation abwei-  
chen muß, die zum Beispiel in der Arbeiten [1,2] benutzt  
wurden. Die Berechnungen des anomalen magnetisches Feldes,  
die sich auf ermittelte Werte remanenter Magnetisationen  
einzelner Proben des vulkanischen Gesteins stützen, die im  
ganzen Querprofil der Wand entnommen wurden, haben tatsäch-  
lich gezeigt, daß die klassischen in der Arbeiten [1,2] be-  
handelten Vorstellungen in diesem Fall im Widerspruch mit  
der festgestellten Wirklichkeit stehen. Die Ergebnisse die-  
ser Berechnungen sind in Form einer Kurve ebenfalls auf dem  
Bild dargestellt. Daraus ergibt sich, daß die Schlangheit  
der berechneter Kurve kleiner sein muß. Diese Forderung er-  
füllt die Einführung fiktiver magnetischer Ladungen dersel-  
ben Polarität an der beiden Tafelseiten. Die Einführung von  
übereinstimmenden Ladungen steht gut im Einklang mit der  
physikalischen Realität, denn sie entspricht unserer Vor-



stellungen vom Verlauf der in rechteckigem Körper unter dem Einfluß hervorgerufenen Magnetisation. Die Größe der erforderlichen Dichte der fiktiven Ladungen wurde auf Grund der ermittelten Werte bestimmt. Berechnungen und Messungen haben ferner erbracht, daß die Größe  $\text{div } \vec{M}_1$ , wo  $\vec{M}_1$  Magnetisation in der Querrichtung ist, im Profil der untersuchten Wand nicht konstant sein kann, sondern daß ihr Nicht-Nullwert praktisch bloß auf den Kontakt Wand x umliegendes Gestein eingeschränkt werden muß. Das zeugt davon, daß die Erhaltung vor allem in Querrichtung verlief, was vom physikalischen Standpunkt aus berechtigter Schluß ist. Eine weitere Korektion der berechneten Kurven wäre durch Einführung des senkrechten Magnetisationsgradienten zu erreichen. Solch ein Gradient ist auf zwei Ursachen zurückzuführen. Die erste ist die Erstarrung des Magmas unter dem Einfluß der schon magnetisierten Oberschichten. Die andere ist die mit der Tiefe zunehmende Magnetisation unter dem Einfluß des sich abschwächenden Demagnetisationsfeldes bei langen dünnen Körpern [3]. Der Einfluß des hydrostatischen Druckes wurde außer Acht gelassen.

#### Literatur:

- [1] A.A. Могачев: Курс магниторазведки. ГИГЛ Москва 1951.
- [2] S. Mareš a kol.: Úvod do užité geofyziky. SNTL Praha 1979.
- [3] A. Sommerfeld: Elektrodynamik. Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Potrig K.-G. Leipzig 1949.



## Исследовательно петрографическая моделировка процесса палагонитизации.

Пешти Л.

Вулканыты - отвержденные в стекловом состоянии, реагируют более чувствительно на вторичные (например гидротермальные) геологические воздействия, чем на кристаллические породы сформированные из той же лавы. Во время палагонитизации вода диффундирует в базальтопирокластику, состоящую в большинстве из стекла, и вследствие этого в нескольких ступенях происходит девитрификация и интергранулярная кристаллизация.

Наши исследования были проведены на образце из стекла, приобретенного искусственно из венгерского базальта при условиях температуры выше  $250^{\circ}\text{C}$  и давления выше  $0,125$  кб. После эксперимента микроскопический облик образцов или минералогический состав обнаруженный рентгенодифрактометрией - соответствует природному палагониту.

В ходе эксперимента и палагонитизации в моменте охлаждения - ионы, раньше фиксированные в принужденном состоянии, под влиянием диффузии воды - мобилизуются. Результат этого с одной стороны, ионы во вне стекла, становленные мезостабильным, дают возможность на формирование кристаллических структур которые благодаря рт определенно стабильные (девитрификация). С другой стороны - ионы со повышенной мобилизацией, выступая из палагонизированного стекла, обеспечивают пополнение ионов образованных в интергранулярной области.



Кристаллические фазы андезит-стекловых образцов, формирующихся в атмосфере воды при высоком состоянии рt.

Пешти Л. - Тот М.

Кристаллические фазы - формирующиеся при девитрификации андезитных стекол, - образцов при воздействии воды с высоким рt - можно определить только рентгенодифракционным методом, смотря их субмикроскопический размер. Целью испытания служило определение качества кристаллических фаз образованных при условиях : 250-550°C и 0,125-2,0 кб и 24-168 час; далее - определение степени кристаллизации фазы плагиокласного состава, происходящего на 450°C. При температуре 250°C обнаруживаются кроме господствующей (исходной) стекловой фазы разные zeолиты, в следах плагиокласы, анацим и смектит. При температуре 350°C состав образцов переходный: удалось обнаружить около господствующего анацима и плагиокласа, 10 Å -ного филлосиликата, 10-14 Å-ного не бухнутого филлосиликатного компонента и 3 слойную смешанную конструкцию. У образцов 450°C, при значительного количества плагиокласов и меньшей анацима, находится амфибол и 10 Å-ный филлосиликат, но смектит или бухнутый 3 слойный филлосиликат не находится. На 550°C характерные плагиокласы и анацим, но уже появляются кристобалит и кварц тоже.

С помощью параметра - потолок/ширина полувеличины - удалось определить, что при изотермных условиях в нашей области исследования повышению степени кристаллизации плагиокласа служит повышение давления. Из исходного образца андезитного стекла при разных параметрах рt образуются кристаллические фазы не только смежно, но частично и заменяя друг-друга, или наверно происходят взаимно друг-из другого.



