

УДК 573.311.3:539.89

ОБ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ

М. М. Горшков, В. Т. Заикин, С. В. Лобачев

Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики, 456770 Снежинск

Измерена удельная электропроводность силикатных горных пород (кварцита, гранита, сухого и влажного туфа) в условиях однократного ударно-волнового нагружения. Показано, что уже при давлении в ударной волне 20 ГПа удельная электропроводность пород изменяется на несколько порядков по сравнению с исходной величиной ($10^{-9} \div 10^{-12} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ для сухих пород) и составляет для кварцита и гранита $0,01 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, для образцов туфа $0,1 \div 1,0 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, а с увеличением амплитуды ударной волны с 20 до 60 ГПа возрастает еще на один-два порядка. В опытах с породами не выявлено резкого изменения электропроводности, наблюдаемого в двуокиси кремния (плавленом кварце) при давлении примерно 40 ГПа.

Исследование изменения электропроводности горных пород при воздействии ударных волн связано с разработкой расчетных моделей генерации электромагнитных импульсов при подземных взрывах для контроля за выполнением Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний. Данные по электропроводности (как часть информации о свойствах горных пород в недрах Земли) могут быть полезны также для решения задач геофизики [1].

Удельная электропроводность σ является одной из основных характеристик электрических свойств среды. Для определения механизма электропроводности минералов и пород используют получаемые в статических условиях зависимости удельной электропроводности от температуры T и давления p [2]. Линейные зависимости $\lg \sigma = f(1/T)$ для силикатных пород имеют участки аномального изменения σ и изломы при $T = 1200 \div 1400 \text{ К}$, соответствующие смене примесной проводимости на собственную. В интервале температур $470 \div 1270 \text{ К}$ удельная электропроводность пород ряда гранит — диорит с массовой долей кварца $20 \div 30 \%$ увеличивается на пять-шесть порядков величины. Зависимости $\sigma(p)$ для пород имеют нелинейный характер и отражают суммарный эффект изменения электропроводности компонентов. Так, удельная электропроводность гранитов в зависимости от содержания кварца и полевых шпатов с увеличением давления до 2 ГПа (в интервале температур $470 \div 770 \text{ К}$) возрастает не более чем на порядок величины, остается постоянной или даже уменьшается.

При динамическом (ударно-волновом) нагружении происходит очень быстрое сжатие и повышение температуры образца. Фронт ударной волны является мощным генератором дефектов, что способствует росту концентрации носителей тока и увеличению электропроводности. Высокая электропроводность при ударном сжатии регистрировалась в экспериментах с различными диэлектрическими материалами. В то же время публикации по электропроводности пород и минералов в ударной волне немногочисленны, из имеющихся результатов интересны данные для плавленого кварца (SiO_2) и фаялита (Fe_2SiO_4). Для

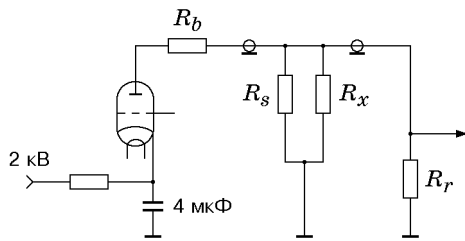


Рис. 1

Рис. 1. Электрическая схема измерения сопротивлений

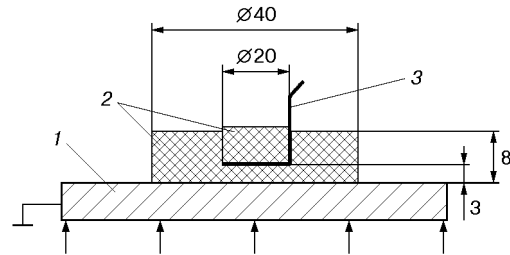


Рис. 2

Рис. 2. Схема экспериментальной ячейки:

1 — экран-электрод, 2 — образец, 3 — вывод верхнего электрода

плавленого кварца при ударном давлении значение σ увеличивается на несколько порядков и достигает $0,1 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ при $p = 35 \text{ ГПа}$ и расчетной температуре 2800 К [3]. В интервале $p = 36 \div 40 \text{ ГПа}$ зафиксировано скачкообразное (почти на два порядка) увеличение σ . Анализ свойств фаялита [4] показал, что при статическом давлении 40 ГПа в нем происходит структурный переход (аморфизация), зафиксированный также по резкому изменению σ в динамических экспериментах [5]. Сложное поведение электрических характеристик кварца и других геологических материалов свидетельствует о невозможности априорной оценки электропроводности пород при ударном сжатии.

В настоящей работе экспериментально исследуется удельная электропроводность трех силикатных пород: кварцита, гранита и туфа — в интервале давлений ударного сжатия $20 \div 60 \text{ ГПа}$.

1. Для измерения электрического сопротивления породы, подвергнутой сжатию ударной волной, применен электроконтактный метод [6]. Импульсный ток подавался на электроды, расположенные в исследуемом образце. При этом регистрировалось падение напряжения. Схема измерения приведена на рис. 1. Источником тока служит заряженный конденсатор. Разряд конденсатора инициируется пусковым сигналом за несколько микросекунд до прихода ударной волны к образцу. В это время регистратор (осциллограф СУР-1) фиксирует падение напряжения V_s на сопротивлении шунта R_s , а с приходом ударной волны к образцу — падение напряжения V на суммарном сопротивлении $R = R_s R_x / (R_s + R_x)$, где R_x — измеряемое сопротивление образца. Если балластное сопротивление R_b и входное сопротивление регистратора R_r намного превышают R_s , то измеряемое сопротивление

$$R_x = R_s V / (V_s - V). \tag{1}$$

Схема экспериментальной ячейки, приведенная на рис. 2, аналогична использованной ранее при исследовании электропроводности полупроводников и диэлектриков (см., например, [7]). Исследуемый образец располагается на алюминиевом диске — экране взрывного устройства, создающего в образце плоскую ударную волну постоянной амплитуды. Экран служит первым электродом, второй (верхний) электрод в виде круга диаметром 20 мм из алюминиевой фольги толщиной 10 мкм расположен внутри породы. В опытах осуществлялось одномерное ударное нагружение породы в межэлектродном промежутке без появления в течение не менее $0,7 \text{ мкс}$ дополнительных ударных волн или волн разгрузки. В опыте определялась зависимость сопротивления образца от времени после прихода фронта ударной волны к верхнему электроду. Удельная электропроводность рассчитывалась по измеренному сопротивлению и геометрическим размерам образца (при сжатии ударной

Таблица 1

Образец	ρ_0 , г/см ³	Объемная доля, %	
		воды	воздуха
Туф:			
сухой	2,31	< 0,1	11
влажный	2,42	11	< 0,5
Гранит	2,62	< 0,1	< 0,5
Кварцит	2,65	< 0,1	< 0,1

волной) с учетом краевых эффектов:

$$\sigma = hf/(\varepsilon SR_x). \quad (2)$$

Здесь h — исходная высота образца; ε — сжатие образца в ударной волне; S — площадь верхнего электрода; R_x — измеренное сопротивление; f — поправочный коэффициент, зависящий от отношения высоты образца к диаметру верхнего электрода. Для выбранной геометрии опытов $f = 0,8$ [8].

Исследовались наиболее распространенные силикатные породы:

1) кварцит — мелкокристаллическая кварцевая порода с массовой долей двуоксида кремния (SiO_2) около 98 %;

2) гранит среднезернистый, содержащий в основном кварц, полевые шпаты, слюды (SiO_2 — 73 %, Al_2O_3 — 13 %, Na_2O — 4 %, K_2O — 3 %);

3) туф — риолитовая туфолава, содержащая SiO_2 (70 %), Al_2O_3 (15 %), Na_2O (5 %), K_2O (5 %).

Образцы пород изготавливались токарной обработкой. Для лучшего контакта с электродами рабочие поверхности образцов шлифовались, при этом высота неровностей составляла менее 10 мкм. Часть образцов туфа насыщалась водой, для сохранения влаги образцы герметизировались в экспериментальной сборке пластилином. Характеристики образцов приведены в табл. 1.

2. Для создания ударных волн применены взрывные метательные и контактные устройства с экранами из алюминия. При известных параметрах ударной волны в экране [9] давление p и массовая скорость U определяются в $(p-U)$ -координатах пересечением изэнтропы разгрузки алюминия с ударной адиабатой породы (рис. 3). Сжатие образца определяется из законов сохранения импульса и массы на ударном фронте

$$p = \rho_0 DU, \quad \varepsilon = D/(D - U),$$

где ρ_0 — исходная плотность; D — скорость фронта волны.

Для пород с высоким упругим пределом Гюгонио — гранита и кварцита, для которых наблюдается двухволновая структура при давлениях нагружения до 30–35 ГПа, — принимались значения параметров ударного сжатия, соответствующие конечному состоянию за фронтом пластической волны.

При определении состояния образцов для кварцита принималась ударная адиабата монокристаллического кварца [10]. Данные по ударной сжимаемости гранита взяты из [11]. Для сухого туфа использовались экспериментальные данные авторов. Давление и сжатие образцов влажного (водонасыщенного) туфа оценены по ударной адиабате, рассчитанной в аддитивном приближении [12]. Водонасыщенный туф рассмотрен как смесь частиц породы и воды. Для породы использовалась ударная адиабата гранита (туф и гранит близки по химическому составу и плотности частиц), данные по ударной сжимаемости воды взяты из [13].

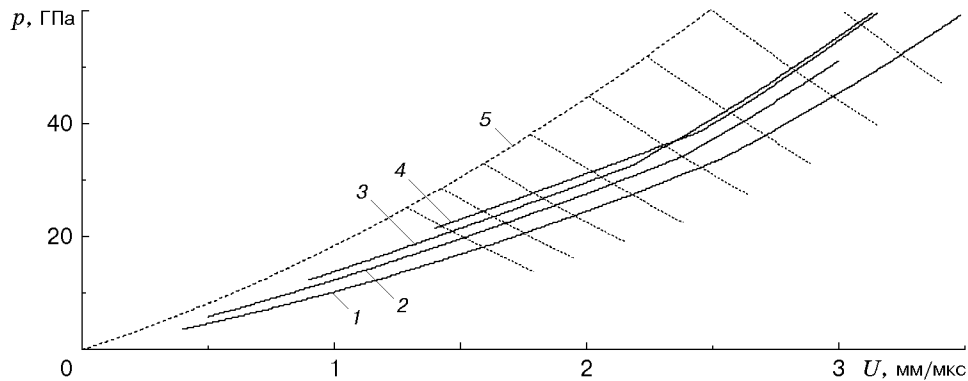


Рис. 3. Ударные адиабаты пород (1 — туф сухой, 2 — туф влажный, 3 — гранит, 4 — кварцит), ударная адиабата и изэнтропы разгрузки алюминия (5)

3. Зависимости сопротивления образца от времени, рассчитанные по формуле (1), представлены на рис. 4. Для определения удельной электропроводности принималось среднее значение сопротивления в интервале $t = 0,1 \div 0,3$ мкс после прихода фронта волны к верхнему электроду ($t = 0$). Эти значения сопротивления R_x , вычисленная по формуле (2) удельная электропроводность σ , а также давление p и сжатие ϵ приведены в табл. 2.

Следует отметить, что определяемые в опытах сопротивления не являются строго постоянными во времени. Так, в сухом туфе в интервале $p = 20,5 \div 44,5$ ГПа через 0,3 мкс после начала записи регистрируется небольшое (примерно двукратное) увеличение сопротивления (менее выраженное при $p = 44,5$ ГПа) (рис. 4,а), а при $p = 18; 52,5$ ГПа оно отсутствует (рис. 4,б). Заметим, что давления, при которых наблюдается изменение сопротивления, соответствуют области фазового перехода в двуокиси кремния [9, 10, 14]. Изменения сопротивления образцов кварцита и гранита, как и следовало ожидать для пород с зернистой структурой, имеют нерегулярный характер (рис. 4,в).

Зависимость $\lg \sigma$ от ударного давления приведена на рис. 5 (значения σ взяты из табл. 2). Ожидалось, что погрешность определения удельной электропроводности конкретного образца составит не более 20%. Как следует из результатов повторных измерений, экспериментальная погрешность значительно превышает это значение, что, по-видимому, обусловлено различием в структуре образцов данной породы, а также несовершенством контакта образца с электродами. На рис. 5 показана аппроксимация экспериментальных данных: сплошная кривая соответствует близким по электропроводности кварциту и граниту, штриховая — сухому и влажному туфу. Приведены также результаты эксперимен-

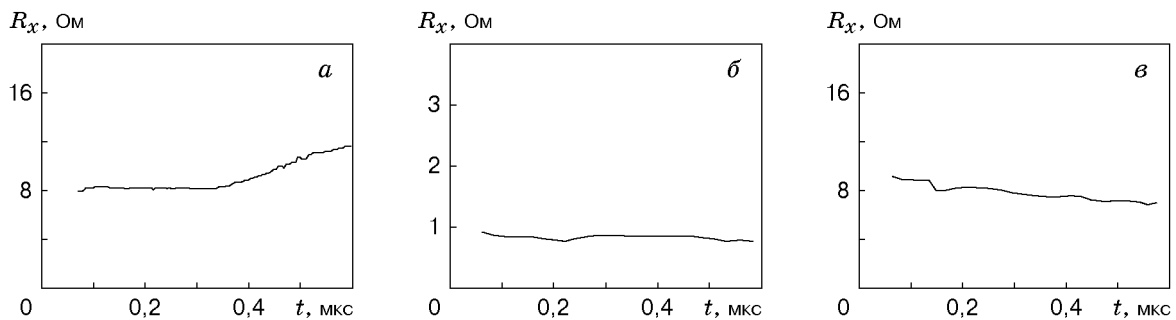


Рис. 4. Зависимость сопротивления образца от времени:
 а — туф сухой ($p = 20,5$ ГПа); б — туф сухой ($p = 52,5$ ГПа); в — гранит ($p = 58$ ГПа)

Таблица 2

Образец	p , ГПа	ε	R_x , Ом	σ , Ом ⁻¹ · м ⁻¹
Туф сухой	18	1,46	85	0,06
	20,5	1,53	8	0,6
	20,5	1,53	30	0,2
	23,5	1,61	1,7	2,8
	27	1,70	2	2,3
	27	1,70	1,25	3,6
	32,5	1,74	0,6	7,3
	38	1,80	0,75	5,6
	44,5	1,85	0,5	8,1
	52,5	1,87	0,8	5,1
Туф влажный	19,5	1,40	4,1	1,3
	23,5	1,44	6,4	0,8
	25,5	1,50	2,4	2,1
	34	1,68	1,3	3,5
Гранит	23,5	1,42	≈ 600	≈ 0,01
	30,5	1,58	28	0,2
	58	1,76	8	0,5
	58	1,76	10	0,4
Кварцит	24,5	1,38	≈ 700	≈ 0,01
	31,5	1,52	≈ 100	≈ 0,05
	31,5	1,52	220	0,02
	41,5	1,73	180	0,03
	49	1,76	65	0,07
	57,5	1,79	19	0,2
	57,5	1,79	16	0,3

тов [3] с плавленным кварцем (штрихпунктирная кривая). В [3] отмечается отсутствие изменения (ионного) характера проводимости при переходе в область давлений фазового превращения кварц — стишовит. При более высоких давлениях (36–40 ГПа) регистрируется “скачок” электропроводности. Изменение электрических свойств подтверждается появлением сильного поляризационного сигнала. Предполагается, что резкое изменение электропроводности вызвано неизвестным ранее превращением. Особенность измерений [3] состояла в том, что сопротивление образца при однократном сжатии определялось в момент прихода фронта волны к верхнему электроду, а изменение сопротивления во времени не регистрировалось. Авторами данной работы проведены измерения в плавленном кварце (по схеме рис. 2) вблизи “скачка” электропроводности при давлениях 35 и 41,5 ГПа. При $p = 35$ ГПа в течение примерно 0,12 мкс регистрируется низкое значение удельной электропроводности $\sigma = 0,06$ Ом⁻¹ · м⁻¹. В последующие 0,3 мкс значение σ увеличивается на порядок (показано стрелкой на рис. 5), что согласуется с предположением авторов работы [3] о возможности временной зависимости электрических свойств плавленного кварца при приближении к “критическому” давлению 40 ГПа. При $p = 41,5$ ГПа фиксируется высокое значение $\sigma = 2$ Ом⁻¹ · м⁻¹, что подтверждает выводы [3]. Следует отметить, что в работе [15] также зарегистрировано скачкообразное увеличение σ для плавленного кварца, при этом давление перехода $p = 29$ ГПа.

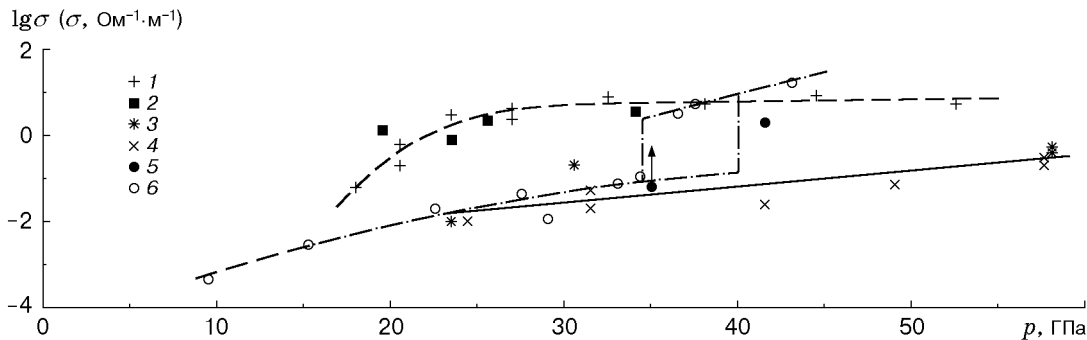


Рис. 5. Зависимость логарифма удельной электропроводности пород от давления в ударной волне:

сплошная кривая — гранит и кварцит, штриховая — сухой и влажный туф, штрихпунктирная — плавленый кварц; 1 — туф сухой, 2 — туф влажный, 3 — гранит, 4 — кварцит, 5 — плавленый кварц, 6 — плавленый кварц [3]

В области давлений перехода кварца в стишовит удельная электропроводность плотных пород (гранита и кварцита) по порядку величины близка к значению σ для плавленого кварца. При большем давлении наблюдается различие: в породах регистрируется плавный рост σ . С целью оценки энергии активации носителей тока необходимо рассмотреть зависимость $\sigma(T)$ для кварцита. Однако в литературе экспериментальные и расчетные значения температуры на ударной адиабате кварца имеются лишь для давлений выше 60 ГПа [16, 17].

На рис. 5 видно, что удельная электропроводность пористых пород (сухого и влажного туфа) на два порядка величины выше, чем для плотных пород. Для сухого туфа такое различие определяется влиянием ионизации воздуха в порах, а также повышенной проводимостью скелета из-за более высоких температур ударного сжатия туфа (как пористой среды [18]). Высокая электропроводность влажного туфа связана с диссоциацией поровой воды. Как следует из [19], при ударном давлении более 20 ГПа вода является почти полностью диссоциированной и ее удельная электропроводность достигает $10^3 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$.

По результатам проведенных измерений представляется возможным оценивать удельную электропроводность силикатных пород различного исходного фазового состава (пористости, влажности). Расчетные схемы должны учитывать изменение структуры порового пространства при ударном сжатии породы (объем, занимаемый поровым веществом, наличие и форму токопроводящих каналов и т. п.). Очевидно, для более надежного прогнозирования электропроводности необходимо проведение дополнительных экспериментов.

Авторы выражают благодарность К. К. Крупникову за внимание к работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Садовский М. А. Насущные задачи геофизики в комплексе наук о Земле // Вестн. АН СССР. 1968. № 1. С. 60–63.
2. Пархоменко Э. И., Бондаренко А. Т. Электропроводность горных пород при высоких давлениях и температурах. М.: Наука, 1972.
3. Kondo K. I., Sawaoka A., Ahrens T. J. Electrical measurements on fused quartz under shock compression // J. Appl. Phys. 1981. V. 52, N 8. P. 5084–5089.
4. Williams Q., Knittle E., Reichlin R., et al. Structural and electronic properties of Fe_2SiO_4 -fayalite at ultrahigh pressures: amorphization and gap closure // J. Geophys. Res. 1990. V. 95, N B13. P. 21.549–21.563.

5. **Mashimo T., Kondo K. I., Sawaoka A., et al.** Electrical conductivity measurement of fayalite under shock compression up to 56 GPa // *J. Geophys. Res.* 1980. V. 85. P. 1876–1881.
6. **Бриш А. А., Тарасов М. С., Цукерман В. А.** Электропроводность продуктов взрыва конденсированных взрывчатых веществ // *Журн. эксперим. и теорет. физики.* 1959. Т. 37, вып. 6. С. 1543–1550.
7. **Kani K., Yamada T., Abe M.** Hugoniot and electric resistivity measurement on amorphous Se // *Proc. of the 4th Amer. phys. soc. conf. on shock waves in condensed matter, Spokane, Washington, 22–25 July, 1985.* N. Y.: Plenum Press, 1986. P. 477–482.
8. **Mitchell A. C., Keeler R. N.** Technique for accurate measurement of the electrical conductivity of shocked fluids // *Rev. Sci. Instrum.* 1968. V. 39, N 4. P. 513–522.
9. **Жугин Ю. Н., Крупников К. К., Овечкин Н. А. и др.** О некоторых особенностях динамической сжимаемости кварца // *Физика Земли.* 1994. № 10. С. 16–21.
10. **Wackerle J.** Shock wave compression of quartz // *J. Appl. Phys.* 1962. V. 33, N 2. P. 922–937.
11. **LASL shock Hugoniot data** / Ed. by S. P. Marsh. Berkely, California: Univ. California Press, 1980.
12. **Дремин А. Н., Карпухин И. А.** Метод определения ударных адиабат дисперсных веществ // *ПМТФ.* 1960. № 3. С. 184–189.
13. **Шарипджанов И. И., Альтшулер Л. В., Брусникин С. Е.** Аномалии ударной и энтропической сжимаемости воды // *Физика горения и взрыва.* 1983. Т. 19, № 5. С. 149–153.
14. **Ahrens T. J., Rosenberg J. T.** Shock metamorphism: Experiments on quartz and plagioclase // *Shock metamorphism of natural materials.* Baltimore: Mono Book Co., 1968. P. 59–81.
15. **Постнов В. И., Набатов С. С., Якушев В. В.** Исследование поведения плавленого кварца за фронтом ударной волны методом измерения электропроводности // *Высокоэнергетическое воздействие на материалы: Тр. IX Междунар. конф., Новосибирск, 18–22 авг. 1986 г.* Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО АН СССР, 1986. С. 106–110.
16. **Lyzenga G. A., Ahrens T. J.** Shock temperatures of SiO₂ und their geophysical implications // *J. Geophys. Res.* 1983. V. 88, N B3. P. 2431–2444.
17. **Альтшулер Л. В., Шарипджанов И. И.** Аддитивные уравнения состояния силикатов при высоких давлениях // *Изв. АН СССР. Физика Земли.* 1971. № 3. С. 11–28.
18. **Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П.** Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.
19. **Hamann S. D., Linton M.** Electrical conductivity of water in shock compression // *Trans. Farad. Soc.* 1966. V. 62. P. 2234–2241.

Поступила в редакцию 20/VII 2000 г.