

Math-Net.Ru

All Russian mathematical portal

E. G. Fateev, Drop effect of the rheological explosion excitation threshold in a super low-frequency electrical field,
Dokl. Akad. Nauk, 1997, Volume 354, Number 2, 252–255

<https://www.mathnet.ru/eng/dan50335>

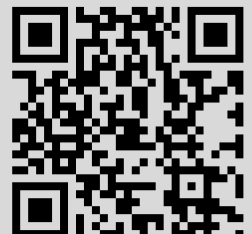
Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you have read and agreed to these terms of use

<https://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 18.97.14.87

May 18, 2025, 10:27:41



УДК 550.3+539.89+537.226

ЭФФЕКТ ПАДЕНИЯ ПОРОГА ВОЗБУЖДЕНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКОГО ВЗРЫВА В СВЕРХНИЗКОЧАСТОТНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

© 1997 г. Е. Г. Фатеев

Представлено академиком В.Н. Страховым 22.12.95 г.

Поступило 16.01.96 г.

Почти все твердые диэлектрики и многие полупроводники имеют свойство взрывоподобно выбрасываться со скоростями $v > 0.5$ км/с из открытой системы сжатия при их сильном одноосном статическом нагружении до некоторых пороговых давлений $P_c > 0.2$ ГПа [1, 2]. Это явление называется иногда реологическим взрывом (РВ). Физико-механические условия, достигаемые в твердых телах перед РВ, во многом подобны тем, которые существуют в зонах сейсмически активных разломов. Поэтому РВ рассматривают как одну из наиболее доступных для экспериментов лабораторную модель землетрясений [2].

Недавно в экспериментах с модельными веществами (кристаллогидратами $\text{NH}_4\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ и $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) обнаружено явление, свидетельствующее о возможности значительного (в 1.5–2 раза) падения порога P_c возбуждения РВ при воздействии на тела переменным электрическим полем в двух узких диапазонах на сверхнизкой (СНЧ) $10 < \omega_1 < 50$ Гц и низкой частоте (НЧ) $5 < \omega_2 < 20$ кГц [3–5].

В данной работе сообщается об обнаружении этого эффекта в СНЧ-диапазоне на примере геологического материала – брусита. Обсуждается возможность глубокого падения порога P_c на СНЧ и с другими минералами, а также сдвига минимума в спектре $P_c(\omega)$ от СНЧ к ультранизким частотам (УНЧ) $\omega \leq 10$ Гц. Свидетельство о существовании этого эффекта с минералами может оказаться ключевым для понимания природы и роли аномально высоких и длительных всплесков интенсивности геомагнитного поля на СНЧ и УНЧ перед некоторыми крупными землетрясениями [6, 7].

Модельные соединения имеют относительно низкий порог возбуждения РВ с $P_c < 3.5$ ГПа, поэтому для них удалось получить достоверный НЧ-электрический спектр $P_c(\omega)$ после 250–300 опы-

тов на каждой паре наковален. Но, как известно, при $P_c > 5$ ГПа у наковален Бриджмена после 3–10 эффектов с РВ твердая вставка из карбида вольфрама разрушается [1–5]. Это обстоятельство не позволяет получить достоверный НЧ-спектр $P_c(\omega)$ для большинства геологических материалов, обладающих микротвердостью $H_m > 50$ Н · м⁻². Однако существует ряд минералов, содержащих химически связанную воду или гидроксильные группировки, у которых $H_m < 50$ Н · м⁻², и среди них брусит $\text{Mg}(\text{OH})_2$ [8]. Брусит – широко распространенный минерал, который, как известно [9], часто встречается в серпентинитах $\text{Mg}_3[\text{Si}_2\text{O}_5](\text{OH})_4$. Серпентинит в условиях роста давлений и температур (например, в сейсмически активном разломе с серпентинизированными породами) неустойчив и обычно разлагается на брусит, воду и другие компоненты [9]. Поэтому быстрое падение порога механической устойчивости брусита (даже на фоне относительной стабильности других пород), вызванное, например, действием переменного электрического поля в СНЧ-диапазоне, может привести к механической неустойчивости сейсмически активного разлома.

СНЧ- и НЧ-электрический спектр $P_c(\omega)$ для брусита (Саткинское месторождение на Урале) находился по той же методике, что и для модельных веществ [3–5]. Единственное отличие заключалось в том, что образцы брусита помещали между наковальнями Бриджмена (с диаметром рабочих плоскостей 5 мм) не в виде порошка, а в форме монолитных брусочков толщиной 1 мм. В результате этих экспериментов в СНЧ-спектре $P_c(\omega)$ для брусита обнаружен глубокий провал, показанный на рис. 1. Для сравнений на этом же рисунке показаны подобные спектры $P_c(\omega)$ и для модельных соединений, у которых, кроме СНЧ-минимумов ($\omega_1 \sim 25\text{--}35$ Гц), существуют и НЧ-минимумы ($\omega_2 \sim 10^4$ Гц).

Из двух моделей описываемого эффекта [5] следует, что глубокие падения порога P_c в СНЧ- и НЧ-электрическом поле могут существовать у твердых соединений, имеющих при сильном одноосном сжатии на СНЧ и НЧ необычно высокий всплеск диэлектрической восприимчивости,

связанный с фазовыми превращениями типа дегидратации. Поэтому дополнительно для выяснения природы глубокого СНЧ-провала в спектре $P_c(\omega)$ с бруситом в условиях одноосного сжатия исследовались его СНЧ- и НЧ-дисперсии диэлектрической проницаемости $\epsilon(\omega)$ и потерь $\text{tg}\delta(\omega)$ (методики измерений описаны в [3–5]). Полученная в начале сжатия $P \sim 0$ и при $P \geq 0.3P_c$ дисперсия $\epsilon(\omega)$ с бруситом показана для сравнения с аналогичными зависимостями для модельных соединений на рис. 2. Видно, что при сжатии образцов брусита до $P \geq 0.3P_c$ его диэлектрическая проницаемость на НЧ возрастает в 40–50 раз, тогда как с модельными веществами – в 10^2 – 10^3 раз. При этом повышенные значения проницаемости в СНЧ-дисперсии $\epsilon(\omega)$ с бруситом поддерживаются минутами, тогда как с модельными соединениями гигантский рост $\epsilon(\omega)$ на СНЧ проявляется в виде краткого ($\Delta t \leq 1$ – 2 с) всплеска. Уровень диэлектрических потерь в брусите на СНЧ в начале сжатия и при $P \geq 0.3P_c$ измерялся термопарой Cu-капель в соответствии с методикой, описанной в работе [3]. Однако в частотной зависимости температурного отклика $\Delta T(\omega) = T(\omega) - 20^\circ\text{C}$ для брусита, в отличие от подобных кривых для модельных веществ, каких-либо значительных максимумов не обнаружено.

Таким образом, эксперименты с бруситом, как и с модельными соединениями, свидетельствуют о связи провалов в спектрах $P_c(\omega)$ с соответствующими особенностями в НЧ-дисперсиях $\epsilon(\omega)$ и $\text{tg}\delta(\omega)$. Так, отсутствие провала в $P_c(\omega)$ для брусита на НЧ можно связать с отсутствием у него при $P \sim P_c$ максимума в НЧ-дисперсии $\text{tg}\delta(\omega)$. Из оценки [3] следует, например, что если в центре сжимаемых образцов (с температурой плавления $T_{\text{melt}} \leq 200^\circ\text{C}$) в момент всплеска НЧ-дисперсии $\text{tg}\delta(\omega)$ имеется скачок $\Delta T \sim 15$ – 20°C , то порог P_c может упасть в 1.5–2 раза. Брусит же имеет $T_{\text{melt}} \geq 800$ – 900°C , поэтому для существенного снижения его P_c на НЧ необходим еще больший подъем ΔT . Поскольку дисперсия $\epsilon(\omega)$ на СНЧ для брусита все-таки проявляется, то можно предположить, что и в его НЧ-дисперсии $\text{tg}\delta(\omega)$ существует размытый максимум. Такая форма НЧ-максимума в $\text{tg}\delta(\omega)$ характерна для сложных многофазных агрегатов типа горных пород [10] из-за набора заряженных частиц (ионов и катионов) с различными временами релаксаций. СНЧ-провал в спектре $P_c(\omega)$ для брусита, так же как и с модельными веществами, можно связывать со значительным ростом СНЧ-дисперсии $\epsilon(\omega)$ при одноосном сжатии этого минерала. Заметим, что СНЧ-провалы в спектрах $P_c(\omega)$ обнаружены практически в одном и том же диапазоне частот для всех трех веществ (рис. 1). Этот интересный факт, однако, не противоречит

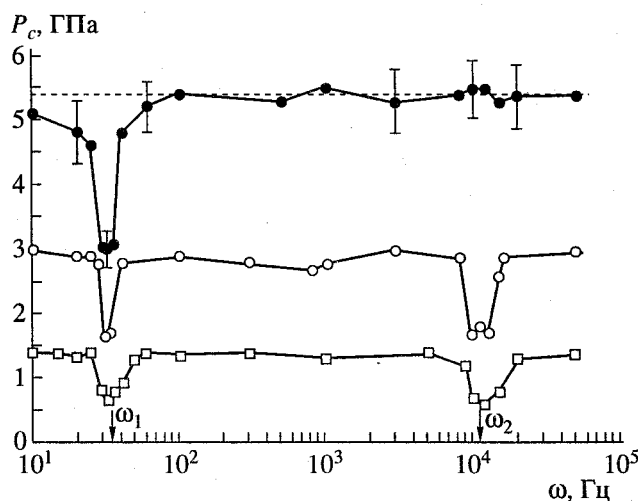


Рис. 1. Низкочастотный электрический спектр порога возбуждения реологического взрыва $P_c(\omega)$ для брусита $\text{Mg}(\text{OH})_2$ (●) при амплитуде импульсов напряжения $U = 65$ В в сравнении с подобными спектрами для модельных соединений $\text{NH}_4\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (□) и $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (○), найденными в [4, 6]. Штриховой линией показан уровень порога P_c для брусита при $U = 0$.

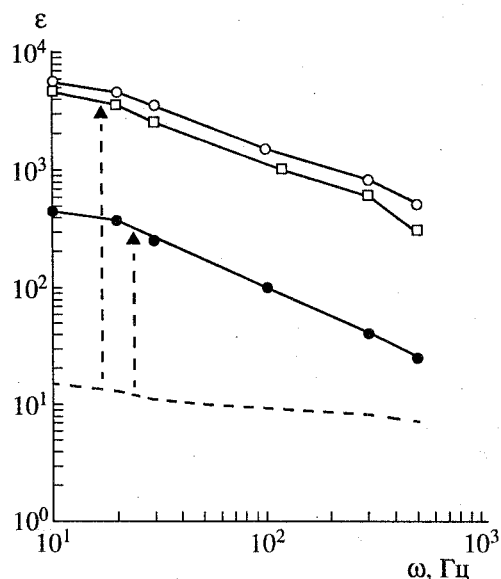


Рис. 2. Сверхнизкочастотная дисперсия диэлектрической проницаемости $\epsilon(\omega)$ в момент максимального роста для брусита при амплитуде импульсов $U = 65$ В в сравнении с подобными спектрами для модельных веществ (обозначения те же, что и на рис. 1). Штриховой линией показан приблизительный уровень СНЧ-дисперсии $\epsilon(\omega)$, характерный для всех трех соединений в начале их сжатия ($P \sim 0$).

ни одной из двух предложенных моделей описываемого эффекта [5]. В обеих моделях снижение порога возбуждения РВ на СНЧ связывается с локализованным на СНЧ электрическим пробоем, вызванным разрядом энергии, накапливаемой в параметрическом конденсаторе (образец между

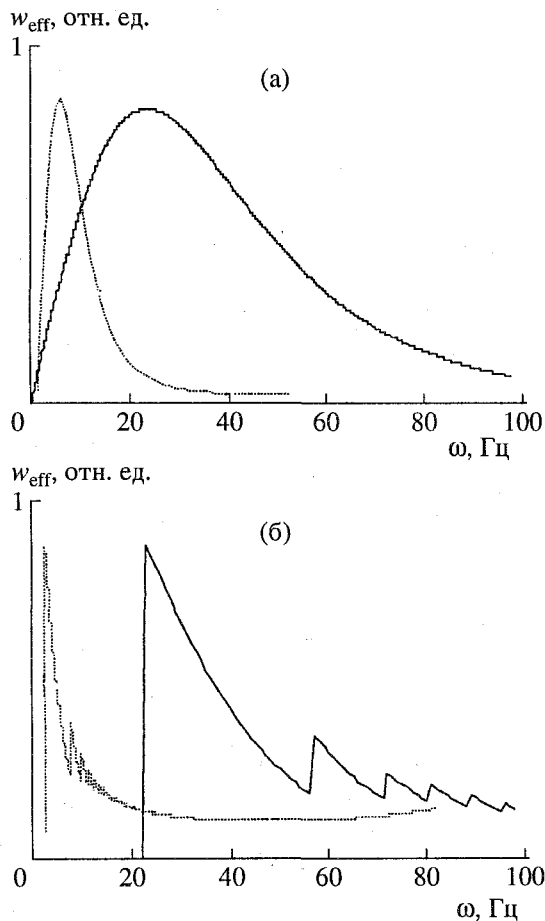


Рис. 3. Сравнение СНЧ-спектров эффективной плотности энергии, способной вводиться в электрический пробой, в моделях локализованного на СНЧ глубокого падения порога возбуждения РВ: а – для модели, соответствующей выражению (1); б – для модели, отвечающей отношению (2). В максимуме всплеска $\epsilon_s \sim 500$ на СНЧ как для рис. 3а, так и для рис. 3б сплошная линия соответствует $\tau \sim 10^{-2}$ с (например для брусита), а пунктирная линия для $\tau \sim 10^{-1}$ с. Такой же уровень эффективного ввода энергии в пробой найден и для $\epsilon_s \sim 4500$, если $\tau \sim 10^{-1}$ с (сплошная линия) и если $\tau \sim 10^{-0.2}$ с (пунктирная линия). В формуле (1) принималось $\gamma \Delta t \sim 10^{-2}$, в отношении (2) $A \sim 10^{-11}$.

наковальнями) в момент всплеска дисперсии $\epsilon(\omega)$. В соответствии с моделью с перколяционным прорастанием пробоя эффективная плотность энергии, вводимая в разряд, имеет корреляционную зависимость от частоты [5]:

$$w_{\text{eff}}(\omega) \propto (U/d)^2 \epsilon^3(\omega) [-1 + \exp(\omega \gamma \Delta t)], \quad (1)$$

где U – амплитуда импульсов напряжения, d – толщина образца и γ – коэффициент, связанный с эффективностью ионизации в диэлектриках. Для нахождения качественного поведения $w_{\text{eff}}(\omega)$ достаточно воспользоваться уравнением Дебая

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_{\infty} + (\epsilon_s - \epsilon_{\infty}) [1 + (\omega \tau)^2]^{-1};$$

здесь ϵ_s – максимальное СНЧ- и ϵ_{∞} – высокочастотное значение в дисперсии $\epsilon(\omega)$, τ – время релаксации связанных зарядов. Из (1) следует, что при кратковременном ($\Delta t \leq 1$ с) всплеске СНЧ-дисперсии $\epsilon(\omega)$ плотность энергии, вводимой в пробой, имеет СНЧ-максимум (рис. 3а). Такой пробой может иметь место при локальных напряжениях поля $E \geq 10^6$ В · см⁻¹. Однако в соответствии со второй моделью провалов в спектрах $P_c(\omega)$ с СНЧ-селективным пробоем газа в микротрещинах [5], возникающих обычно при одноосных сжатиях еще при давлениях порядка $P \geq 0.3 P_c$, достаточно появления локальной напряженности $E \leq 10^4$ В · см⁻¹. В этой модели эффективная плотность электрической энергии, вводимой в плазменный пробой, также находится в корреляционной связи с частотой:

$$w_{\text{eff}}(\omega) \propto (U/d)^2 \epsilon^3(\omega) [1 - \exp(-t_{\text{sp}} A / \epsilon(\omega))], \quad (2)$$

где $t_{\text{sp}} \sim \epsilon^{-1}(\omega)$ – характерное время формирования искрового разряда [11]. При определенных значениях параметра $A \sim n_0 e \mu$, отражающего характеристики ионизованного газа (n_0 – концентрацию, μ – подвижность, e – заряд частиц, зависимость (2) имеет максимум на СНЧ (рис. 3б). Если учесть более низкие напряженности поля, необходимые для пробоя ионизованного в трещине газа, то вторая модель представляется более перспективной. Этот же вывод следует из оценки величины давления $P_f \leq 0.5$ ГПа во фронте ударной волны, генерируемой между берегами микротрещины [12]. Такие ударные волны могут привести к значительному снижению порога P_c .

Демонстрация глубокого провала в СНЧ-спектре $P_c(\omega)$ на примере природного минерала брусита, обладающего в условиях одноосного сжатия в 40–50 раз более высокими, чем в нормальных условиях, значениями диэлектрической проницаемости в СНЧ-дисперсии $\epsilon(\omega)$, наводит на мысль о возможности существования описываемого эффекта и с другими геологическими материалами. Действительно, со многими минералами с адсорбированной водой наблюдалась сильная СНЧ-дисперсия $\epsilon(\omega)$. Более того, при нагревании до температур $T \geq 300$ – 900°C у многих горных пород значения СНЧ-дисперсии диэлектрической проницаемости $\epsilon(\omega)$ превосходят обычные в 10 – 10^3 раз [10]. Это указывает на то, что порог механической устойчивости горных пород, находящихся в сейсмоактивных пластах Земли при высоких давлениях и температурах, может быть весьма чувствительным к относительно слабым СНЧ-колебаниям внешних электрических и магнитных полей. Кроме того, из отношения (2) следует, что при больших временах релаксации связанных зарядов $\tau > 10^{-1}$ с (которые возможны у геологических материалов [10] в зонах разломов) острый максимум в спектре $w_{\text{eff}}(\omega)$ может быть сдвинут в область УНЧ $\omega < 10$ Гц (рис. 3б).

Соответственно, глубокий провал в спектре $P_c(\omega)$ также может оказаться в области УНЧ. С другой стороны, известны случаи, когда перед некоторыми крупными землетрясениями, например в Калифорнии [7] и на Кавказе [13], наблюдались продолжительные аномальные возмущения геомагнитного поля на УНЧ (выше фоновых значений на два порядка). Все это позволяет предполагать о принципиальной возможности инициирования "подготовленных" землетрясений внешними (к активным разломам) продолжительными УНЧ-всплесками электрических и магнитных полей. УНЧ-электромагнитные пульсации могут возникать в ионосфере или в процессах трещинообразования земной коры [14, 15]. В последнем случае, по-видимому, возможен обмен энергией между слоями литосферы, генерирующими и поглощающими электромагнитные поля в УНЧ-диапазоне.

В заключение автор выражает признательность В.Н. Авдониному (Уральский геологический музей) за любезно предоставленные образцы брусита, Т.В. Бакицкой, А.В. Николаеву, О.А. Похотелову и Ю.П. Сквородкину – за ценные обсуждения и полезные замечания.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 95-05-14488).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bridgman P.W.* // *Phys. Rev.* 1935. V. 48. P. 825–847.
2. *Ярославский М.А.* Реологический взрыв. М.: Наука, 1982. 193 с.
3. *Фатеев Е.Г.* // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. № 10. С. 48–52.
4. *Фатеев Е.Г.* // Там же. 1994. Т. 20. № 20. С. 83–88.
5. *Фатеев Е.Г.* // ЖТФ. 1996. Т. 66. № 6. С. 93–105.
6. *Breiner S.* // *Nature.* 1964. V. 202. P. 790–791.
7. *Fraser-Smith A.C., Bernardi A., McGill P.R. et al.* // *Geophys. Res. Lett.* 1990. V. 17. P. 1465–1468.
8. Минералы. Справочник. М.: Наука, 1967. Т. 2. В. 3. 650 с.
9. *Finger L.W., Ko J., Hazen R.M. et al.* // *Nature.* 1989. V. 341. P. 140–142.
10. *Пархоменко Э.И.* Геоэлектрические свойства минералов и горных пород при высоких давлениях и температурах. М.: Наука, 1989. 198 с.
11. *Королев Ю.Д., Месяц Г.А.* Физика импульсного пробоя газов. М.: Наука, 1991. 224 с.
12. *Фатеев Е.Г.* // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. № 10. С. 48–52.
13. *Копытенко Е.А., Матиашвили Т.Г., Воронов П.М. и др.* Препринт ИЗМИРАН. М., 1990. № 3а (888). 28 с.
14. *Гершензон Н.И., Гохберг М.Б.* // Физика Земли. 1994. № 2. С. 19–24.
15. *Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Похотелов О.А.* Сейсмоэлектромагнитные явления. М.: Наука, 1988. 174 с.