

2. Duncan Carr Agnew, Frank K. Wyatt. Long-Base Laser Strainmeters: A Review // Institute of Geophysics and Planetary Physics Scripps Institution of Oceanography University of California, San Diego, Scripps Institution of Oceanography Technical Report, 6 January 2003

3. Долгих Г.И., Валентин Д.И., Долгих С.Г., Ковалев С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В., Фищенко В.К. Применение лазерных деформографов вертикальной и горизонтальной ориентаций в геофизических исследованиях переходных зон // Физика Земли, 2002, N8, с.69-73.

4. М.Н. Дубров, Д.В. Александров Проведение испытаний мобильного лазерного деформографа на морской экспедиционной станции м. Шульца. Пятый Всероссийский симпозиум «Физика геосфер». Материалы докладов. Владивосток, 3-7 сентября 2007 г. с. 65-70

5. Д.В. Александров, М.Н. Дубров Результаты измерений деформаций Земной поверхности с помощью лазерных интерферометров, Вестник СПбО АИН № 3- 5, отдельный 3-х томник за 2009 г, с 105-113.

6. Александров Д.В., Алешин В.А., Дубров М.Н. Разработка методов линеаризации и анализа данных лазерного интерферометра-деформографа // «Лазеры, измерения, информация», Тезисы докладов конференции, 3-5 июня 2008 г., Санкт-Петербург, с. 15.

**О БАЗОВЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ЭФФЕКТАХ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ВОЗМОЖНОСТЬ  
ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА  
ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ В НАГРУЖЕННЫХ ОБРАЗЦАХ ГЕОМАТЕРИАЛОВ.  
ON THE FUNDAMENTAL EFFECTS ALLOWING THE INFLUENCE OF  
ELECTROMAGNETIC PULSES OVER MICROCRACKING IN  
LOADED SPECIMENS OF MATERIALS**

**Л.М. Богомолов<sup>1</sup>, А.С. Закупин<sup>2</sup>, В.А. Гаврилов<sup>3</sup>, В.А. Мубассарова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>- Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН

<sup>2</sup>-Научная станция РАН в г. Бишкеке, Киргизстан,

<sup>3</sup>-Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

*The work is devoted to the peculiar features of acoustic emission, (AE) responses triggered by external actions of electromagnetic pulses over loaded rocks specimens. New results on AE responses have been obtained, which manifested themselves the rate of defects formation in rocks. The model is proposed that relates origination of AE responses to nonlinear resonant interaction similar to stimulated Brillouin scattering. This model (coming from Nonlinear Optics and Condensed Media Physics) allows understanding of that why triggered variations of AE activity are similar for specimens with differing properties, in particular semi-brittle and pseudo-plastic, dry and water-saturated.*

Идея невзрывного, вибросейсмического либо электромагнитного инициирования слабых сейсмических событий для ускорения разрядки избыточных напряжений в геосреде и снижения риска катастрофического землетрясения приобретает все большую популярность. Определенный вклад в решение вопросов, тематически связанных с этим замыслом, может внести лабораторное моделирование процессов разрушения материалов земной коры при воздействиях импульсов физических полей (так называемых энерговоздействиях). Наблюдения влияния нестационарных физических полей на разных масштабах: от лабораторного при характерной длине 1-10 см, до натурального – километрового взаимно дополняют друг друга [1-3]. Влияние физических полей (в частности, электроимпульсов и вибраций) на скорость роста микротрещин в образцах горных пород исследовалось в ряде работ при помощи метода акустической эмиссии, АЭ (обзор в [1]). Был выявлен эффект прироста активности АЭ, стимулированного внешними электромагнитными полями [1,2], который свидетельствует об их влиянии на скорость трещинообразования. Такое влияние электромагнитных полей (ЭМП) определяется их взаимодействием со структурными дефектами в диэлектрических материалах (в частности, в ионных кристаллах). Взаимосвязь электрических полей, обусловленных поляризацией горных пород, с релаксационными процессами (проявлением пластичности), продемонстрирована в [4] для случая образцов без пьезоэлектрических свойств, находящихся при относительно небольших нагрузках

В настоящей работе продолжено изучение особенностей откликов акустической эмиссии на импульсы ЭМП. Дополнительные воздействия импульсными полями осуществлялись в ходе сеансов при испытаниях образцов на ползучесть на бесшумных реологических прессах. Методика исследования детально изложена в [5]. Сигналы АЭ регистрировались в широком частотном диапазоне от 80 кГц до 2,5 МГц, аппаратура работала в ждущем режиме. В проведенной серии экспериментов подтвержден ранее полученный результат, что при нагрузках 70-95 % от

максимальных (для конкретного образца) отдельно взятый отклик не приводит к изменению деформации свыше  $10^{-5}$ , (т.е. соответствующие изменения размеров образцов меньше микрона). В качестве примера на рис. 1 показаны отклики образцов габбро и каменной соли. При длительном воздействии с использованием в качестве источника генератора Г5-54 амплитуда напряженности электрического поля была в пределах 0,8-1,5 кВ/м, а при импульсных воздействиях конденсаторных разрядов – на порядок выше. Эксперименты с образцами каменной соли представляют особый интерес – это псевдопластичный материал, в котором заведомо отсутствуют пьезоэлектрические фракции и пленки водяного пара, существенно влияющие на поведение трещин. Случай рис. 1с демонстрирует, что, во-первых, отклик образца каменной соли не менее контрастен, чем габбро, и, во-вторых, характеризуется режимом пропорционального, самосогласованного прироста активности слабых и сильных событий. При этом слабые события вносят основной вклад в общий прирост числа накопленных событий.

При сравнении результатов с материалами предшествующих работ [2,5] важное значение имеют примеры сходства откликов образцов каменной соли (рис.1с) и габбро (рис.1а), а также сходство с рассмотренными в [5] откликами кварцита и гранита. Оказалось, что по данным АЭ геоматериалы с различными пьезоэлектрическими и реологическими свойствами сходным образом реагируют на воздействие ЭМП. Для объяснения столь нетривиального обстоятельства можно предположить, что во всех случаях под влиянием электромагнитных импульсов происходит возбуждение микроколебаний (слабых вибраций), а они уже оказывают триггерное воздействие на рост микротрещин. Действительно, эффект стимулирования АЭ слабыми низкочастотными вибрациями хорошо известен благодаря работам, где был установлен фундаментальный характер такого влияния вибраций на разных масштабах: от сантиметровых (лабораторных, [6,7]), до километровых и более (натурных, [8]). Отметим, что эти работы сыграли исключительно важную роль в становлении концепции управления режимом выделения накопленной энергии и способствовали постановке экспериментов по моделированию электромагнитных воздействий.

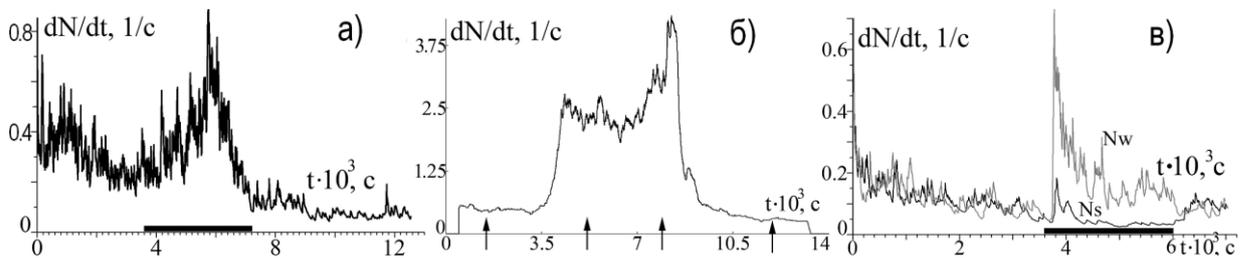


Рис.1. Временные зависимости активности АЭ образцов в сессиях с подачей электроимпульсов при постоянной нагрузке: а) образец габбро при нагрузке 92% от разрушающей и воздействии импульсов Г5-54 (параметры – 30В, 2мкс, 90кГц; б) образец габбро на ступени нагружения 98%, стрелки -серии из 10 конденсаторных разрядов с максимальным напряжением 500В, длительностью около 1мкс; в) селективная активность образца каменной соли при нагрузке 70 % от разрушающей, рассчитанная по выборкам событий с меньшей ( $N_w$ ) и большей  $N_s$  амплитудами,  $N(t) = N_w(t) + N_s(t)$ . Параметры- 60В, 5мкс, 2кГц. Полоса на графиках а), в) указывает время воздействия импульсов генератора Г5-54

По оценкам [9], эффект отклика активности АЭ образцов горных пород проявляется, когда амплитуда колебания давления становится порядка  $10^{-6}$  от уровня главного напряжения. При воздействии высоковольтных разрядов возможность генерации колебаний с амплитудой такого порядка вытекает непосредственно из уравнений электродинамики, описывающих пондеромоторные силы, действующие на диэлектрические материалы с дисперсией [10]. Однако до настоящего времени оставался загадочным механизм возбуждения “аномальных” вибраций в сессиях с генератором Г5-54, т.е. при относительно небольшой напряженности поля. По мнению авторов, важным обстоятельством является резкость изменения поля при подаче прямоугольных импульсов. При этом может проявиться такой волновой эффект как нелинейное резонансное взаимодействие звуковых и электромагнитных волн, с резонансом на разностной частоте. Для параметров импульсов Г5-54 в экспериментах по электровоздействию на АЭ образцов каменной соли крутые фронты нарастания с длительностью менее 0,1 мкс обеспечивают возбуждение большого числа гармоник в полосе частот выше  $\omega \sim 10^7$  1/с. Среди них найдутся частоты  $\omega_1, \omega_2$ , лежащие в диапазоне  $10^7$  1/с, для которых разность  $\omega_1 - \omega_2$  попадает в диапазон звуковых частот  $\omega_s$  от сотен 1/с до  $10^3$  1/с. При таком резонансе звуковая волна с частотой  $\omega_s = \omega_1 - \omega_2$  будет

усиливаться. По-существу, эффект является низкочастотным аналогом известного в нелинейной оптике эффекта вынужденного рассеяния Бриллюэна [11] – рассеяния света на временных флуктуациях диэлектрической проницаемости, возникающих вследствие флуктуаций плотности, т.е. при деформации. В нагруженных образцах при образовании микротрещин в окружающем объеме вещества несомненно имеют место неоднородные возмущения деформации. Если эти возмущения получают дополнительную энергию и импульс от внешнего поля, а акустическая добротность среды достаточно велика, колебания распространяются и могут оказывать триггерное влияние на рост трещины в другой области. Далее процесс повторяется и, таким образом, может произойти “саморазгон” роста микротрещин, проявляющийся в экспериментах как временный прирост активности АЭ. Для горных пород без крупных трещин добротность при атмосферном давлении  $Q \sim 100-400$ , а в сжатом состоянии может достигать нескольких тысяч [12]. Фактор добротности имеет решающее значение. Так как благодаря нему взаимодействие электромагнитных волн со звуковыми может продолжаться намного дольше времени пробега упругой волны, возникающей при образовании трещины. При этом устраняется неэффективность взаимодействия электромагнитных волн с частотой  $\omega \sim 10^7$  1/с (соответствующей длине волны  $\lambda = 2\pi C/\omega \sim 100$  м) с объектами (флуктуациями) малых размеров (от длины микротрещины порядка 10-100 мкм, до нескольких сантиметров, т.е. характерного размера образца).

Электроды, на которые подавались импульсы генератора Г5-54, устанавливались на противоположных боковых поверхностях испытываемого образца. При этом переходные процессы описываются как распространение двух электромагнитных волн с векторами Умова-Пойнтинга, направленными противоположно друг другу (рис. 2). В теоретической модели вынужденного рассеяния Бриллюэна [11] это соответствует случаю “рассеяния назад”, при котором условие усиления звуковой волны записывается в форме:

$$\omega_S = (V_S/C) \cdot (\omega_1 + \omega_2) \approx 2 (V_S/C) \omega_{1,2}, \quad (1)$$

где  $V_S$  – скорость звуковой волны,  $C$  – скорость электромагнитных волн, для сплошной консолидированной среды обычно  $V_S/C \sim 10^{-5}$ . Поэтому условие (1) совместимо с требованием  $\omega_S = \omega_1 - \omega_2$ , если  $\omega_{1,2} \sim 10^7$  1/с, а частота звуковых волн находится в диапазоне от сотен 1/с до  $10^3$  1/с. При рассматриваемом классическом (неквантовом) варианте модели вынужденного рассеяния Бриллюэна [11] макроскопическим проявлением этого эффекта, наряду с возбуждением колебаний на частоте  $\omega_S$ , является различие затухания волн  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ , (см.рис.2). Оценить амплитуду микровибраций, возникающих при вынужденном Бриллюэновском рассеянии можно при помощи следующей формулы [11]:

$$\delta\sigma \approx \pi \cdot \epsilon_0 \epsilon_{(1)} \cdot G^2 \omega_S \cdot E_{\sim}(\omega_1, k_1) \cdot E_{\sim}(\omega_2, k_2) / (2\rho V_S \Gamma_S), \quad (2)$$

где обозначено:  $\rho$  – плотность материала,  $G$  – упругий модуль, так что  $V_S^2 \sim G/\rho$ ,  $\Gamma_S$  – коэффициент поглощения звука, выражающийся через добротность  $Q$  соотношением  $\Gamma_S = \omega_S/2\pi Q$ ,  $E_{\sim}$  – амплитуда напряженности электрического поля в волне с указанной частотой и волновым числом  $k$ ,  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м,  $\epsilon_{(1)}$  – возмущение диэлектрической проницаемости при флуктуации плотности, которое в приближении теории возмущений оценивается по формуле  $\epsilon_{(1)} \sim (d\epsilon/d\sigma)\sigma_{\sim}$ . Если для грубых оценок взять  $\sigma_{\sim} \sim 0,2-0,5 \sigma$  (имеем дело с окрестностью растущей трещины), то подстановка всех промежуточных соотношений в (2) приводит к выражению:

$$\delta\sigma \sim \pi^2 \cdot 1/2 \cdot \epsilon_0 \epsilon \cdot E_{\sim}^2, \quad (3)$$

которое подтверждает, что в обсуждаемых экспериментах при характерных значениях  $E \sim 1$  кВ/м (случай использования Г5-54) действительно могут возбуждаться колебания с амплитудой давления (напряжения) порядка  $10^{-7}-10^{-6}$  относительно уровня главного сжимающего напряжения. Важно отметить, что амплитуды колебаний напряжения на частоте  $\omega_S$  оказались примерно в  $10 Q$  раз больше значений, получаемых по стандартным выражениям для плотности пондермоторных сил в квазистационарном случае [10], при одних и тех же величинах электрической напряженности  $E$ . Вышерассмотренный механизм возбуждения колебаний объясняет, в какой-то степени, сходство акустоэмиссионных откликов на действие слабых низкочастотных вибраций и на импульсы ЭМП, которое ранее отмечалось в ряде работ.

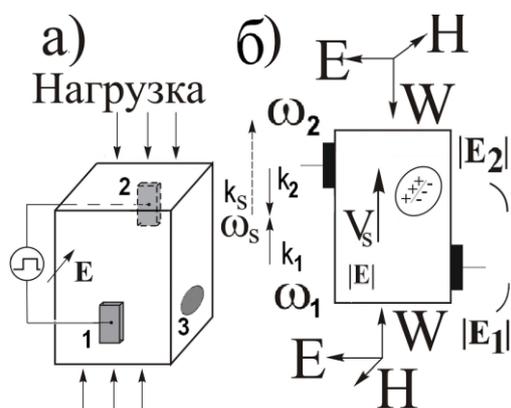


Рис.2.Аналог нелинейного трехволнового взаимодействия в классической физике: резонанс на биениях электромагнитных волн с близкими частотами  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ : а) типовая схема размещения электродов на образце; б) геометрия задачи с областью, где при росте трещины возникают колебания диэлектрической проницаемости. Показаны направления распространения взаимодействующих волн и усиленной звуковой волны для условного случая, когда волна с частотой  $\omega_1 > \omega_2$  “идет снизу”. Область сильных флуктуаций выделена эллипсом. 1, 2- подводящие электроды, 3 – место расположения датчика АЭ либо геофона.

Гипотеза о механизме триггерного влияния на АЭ электромагнитных импульсов через возбуждение низкочастотных вибраций выглядит как неожиданная, поскольку широко распространено представление, что реакция среды (изменение в процессе деструкции) начинается на низших масштабных уровнях, а малым размерам соответствуют более высокие частоты. Однако имеются данные об опережающем возбуждении именно низкочастотных вибраций в сессии с электровоздействием. Эксперимент был проведен на гравитационно- рычажном прессе в 2008 г. с целью сравнения потока обычных сигналов АЭ (с локализацией спектра в полосе 100-500 кГц) и вариаций уровня средней амплитуды низкочастотных сигналов (так называемой геоакустической эмиссии (ГАЭ) в диапазоне частот  $10^2 - 10^3$  Гц), которые регистрировались при помощи геофона пьезоэлектрического типа, идентичного применяемому при скважинных измерениях [13]. В измерительных сессиях включался либо высокочастотный, либо низкочастотный канал, во избежание взаимного влияния первичных пьезопреобразователей. Для испытанного гранитного образца при порядка 80% от разрушающей отклик активности АЭ на импульсы ЭМП (конденсаторные разряды) наступал задержкой 600-1000 с. На рис.3 показано изменение уровня амплитуды ГАЭ в ходе сеанса при воздействии таких же импульсов на 2-7 мин. Прирост уровня ГАЭ произошел раньше, по сравнению с характерной задержкой отклика активности высокочастотных АЭ. Но именно это следует из рассуждений о резонансном усилении низкочастотных вибраций за счет вынужденного Бриллюэновского рассеяния.

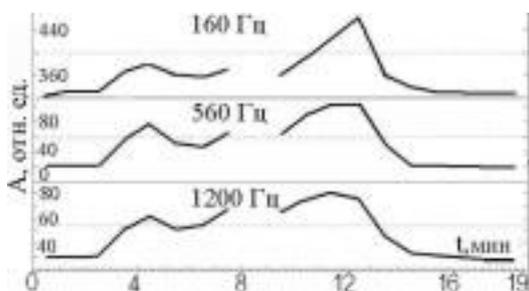


Рис.3. Временная зависимость амплитуды низкочастотной эмиссии на различных частотах. Конденсаторные разряды (максимальное напряжение 600 В, длительность ~ 2 мс) проводились раз в минуту с 2 по 7 минуту данного сеанса. Разрыв графиков связан с паузой в регистрации, необходимой для выгрузки данных.

На основе полученных результатов и предложенной модели продолжение исследований триггерных эффектов ЭМП может проводиться в обычном для современной физики режиме выдвигания и экспериментальной проверки гипотез с последующим уточнением модели и т.д.

### Литература

1. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука. 2003. 270 с.
2. Bogomolov L.M., P'ichev P.V., Novikov V.A. et al. AE response of rocks to electric power action as seismic-electric effect manifestation. // Annals of Geophysics. 2004. V. 47. N. 1. P. 65-72.
3. Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В., Авагимов А.А., Зейгарник В.А. Воздействие мощных электромагнитных импульсов на сейсмичность Средней Азии и Казахстана. // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4-5. С. 152-160.
4. Куксенко В.С., Махмудов Х.Ф., Пономарев А.В. Релаксация электрических полей, индуцированных механической нагрузкой в природных диэлектриках. // ФТТ. 1997. Т. 39. №7. С. 1202-1204

5. Закупин А.С., Аладьев А.В., Богомолов Л.М. и др. Взаимосвязь электрической поляризации и акустической эмиссии образцов геоматериалов в условиях одноосного сжатия. // Вулканология и сейсмология. 2006. № 6. С. 22-33.
6. Куксенко В.С., Манжиков Б.Ц., Тилегенов К. и др. Триггерный эффект слабых вибраций в твердых телах (горных породах). // ФТТ. 2003. Т. 45. № 12. С. 2182-2186.
7. Мирзоев К.М., Виноградов С.Д., Рузибаев З. Влияние микросейсм и вибраций на акустическую эмиссию. // Физика Земли. 1991. № 12. С. 69-72.
8. Мирзоев К.М., Негматуллаев С.Х., Дастури Т.Ю. Влияние механических вибраций на характер высвобождения сейсмической энергии в районе водохранилища Нурекской ГЭС. Сейсмологические исследования в районах строительства крупных водохранилищ Таджикистана. Душанбе: Дониш. 1987. С.101-119.
9. Богомолов Л.М., Манжиков Б.Ц., Трапезников Ю.А. и др. Виброупругость, акустопластика и акустическая эмиссия нагруженных горных пород. // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. № 10. С. 1678-1689
10. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука. 2 изд. 1982. 620 с
11. Шуберт М, Вильгельми Б. Введение в нелинейную оптику. М: Мир. 1973. 244 с.
12. Назаров В.Е., Радостин А.В. Нелинейные волновые процессы в упругих микронеоднородных средах. Нижний Новгород: ИПФ РАН. 2007. 256 с.
13. Гаврилов В.А., Морозова Ю.В., Сторчеус А.В. Вариации уровня геоакустической эмиссии в глубокой скважине Г-1 (Камчатка) и их связь с сейсмической активностью// Вулканология и сейсмология. 2006. № 1. С.52-67.

**ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО И ВЫСОКОЧАСТОТНОГО  
ГЕОАКУСТИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В ОСАДОЧНЫХ ПОРОДАХ НА СТАНЦИИ  
КАРЫМШИНА**

**INVESTIGATION OF DEFORMATION AND HIGH FREQUENCY GEOACOUSTIC PROCESS  
IN SEDIMENTARY AT KARYMSHINA STATION**

*И.А. Ларионов, Ю.В. Маранулец, Б.М. Шевцов*

Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН

*Investigation of sedimentary deformations is determined by their significant role in many geophysical processes which are considered in seismology, oceanology, mining and so on. Many natural phenomena in sedimentary are the result of its low strength and high plasticity, which are determined by external factors. In mediums with similar properties favorable conditions are formed, where even weak deformation changes occur. This changes entail clearly registered acoustic signals, that is why it is perspective to allocate detection systems in such mediums and to investigate earthquake precursors the appearance of which is determined by sedimentary properties. In the paper the results of joint researches of deformation and high frequency geoaoustic process in sedimentary at Karymshina station are considered. Deformation measurements were carried out by unequal-arm laser deformograph-interferometer. Geoaoustic emission is registered by directed acoustic receivers oriented vertically downward and located around the measuring arm of the deformograph in artificial pools.*

Актуальность изучения деформаций осадочных пород обусловлена их важной ролью во многих геофизических процессах, которые рассматриваются в сейсмологии, океанологии, горном деле и т.д. Широкий круг природных явлений в осадочных породах связан с их малой прочностью и высокой пластичностью, которые существенно зависят от внешних факторов. Благодаря этим свойствам даже низкие напряжения в таких средах вызывают появление хорошо регистрируемых акустических сигналов, что и было обнаружено в ряде работ по исследованию геоакустических предвестников землетрясений [1,2], но как они связаны с характеристиками деформационного процесса, этот вопрос оставался открытым. Так же необходимо было выяснить, каковы масштабы этого процесса, и возможна ли связь деформационных изменений в пунктах наблюдений с источниками напряжений в областях, которые удалены на сотни километров.

В настоящее время в системе регистрации геоакустических сигналов на станции Карымшина используется приемная система направленных акустических приемников, установленных в небольших искусственных водоемах. С выходов приемников сигналы в диапазоне частот 0.1-11000 Гц усиливаются, обрабатываются фильтрами по частотам 0.1-10, 10-50, 50-200, 200-700,