

¹ Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г.Петропавловск-Камчатский, salt@emsd.ru

² Геофизическая обсерватория "Борок", филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

Введение. К настоящему времени накоплен достаточно большой объем данных о воздействии земных приливов на сейсмичность в целом и на ее нижний энергетический уровень – высокочастотный сейсмический шум в частности. За 25 лет, прошедшие с открытия амплитудной модуляции сейсмических шумов длиннопериодными деформационными процессами (один из которых – земные приливы) [1], получены результаты, не только подтвердившие открытие, но и продемонстрировавшие новые аспекты модуляции: нестабильность во времени, связь с напряженным состоянием среды [2, 3, 4]. Однако анализ данных, полученных только по естественным наблюдениям, не может дать полного объяснения выявленных эффектов. Поэтому были проведены эксперименты, направленные на воспроизведение влияния земных приливов на сейсмичность в контролируемых лабораторных условиях. Аналогом сейсмических событий выступают импульсы акустической эмиссии (АЭ). Тектонические деформации имитируются одноосным сжатием с постоянной скоростью, приливы – наложением на него слабых периодических вариаций. Для соблюдения подобия между натурными наблюдениями и лабораторным экспериментом амплитуда слабых вибраций должна быть на несколько порядков меньше среднего уровня фоновой деформации. В природе это соотношение достигает 10^{-3} : приливные деформации – 10^{-7} , тектонические деформации – 10^{-4} .

Аппаратура. Лабораторное моделирование проведено в Геофизической обсерватории “Борок” ИФЗ РАН. В качестве основного инструмента используется программно-управляемая электрогидравлическая система INOVA [5], позволяющая проводить полномасштабные эксперименты по изучению процессов разрушения горных пород. Высокоточная система регистрации различных физических параметров, таких как нагрузка, осевая и радиальная деформация, скорости упругих волн, волновые формы АЭ, делают весь комплекс уникальным исследовательским инструментом, не имеющим аналогов в России. Программа управления позволяет контролировать ход эксперимента в автоматическом режиме. Имеется возможность задавать практически любой режим испытаний, включая программируемое модулирующее воздействие.

Режим испытаний. В качестве основного был выбран режим осевой деформации с постоянной скоростью, равной 10^{-7} с^{-1} (корректнее говорить о ступенчатом деформировании на 10^{-6} каждые 10 с), на которую накладывалось модулирующее воздействие заданной амплитуды и частоты. Модулирующее воздействие выбрано в виде меандра с периодом $T=60$ с. Проведено четыре эксперимента с различной амплитудой меандра $A_\varepsilon = (16...2) \cdot 10^{-6}$. Эксперименты велись до полного разрушения исследуемого образца.

Использованные материалы. Для проведения испытаний на системе INOVA изготавливаются цилиндрические образцы горных пород высотой 60 мм и диаметром 30 мм. В качестве основного исходного материала был использован кварцевый песчаник Bentheim с пористостью 23%. Такой выбор обусловлен в первую очередь тем, что материал с равномерной мелкозернистой структурой создает в процессе разрушения стабильный и интенсивный поток событий акустической эмиссии. Это дает возможность для дальнейшего статистического анализа событий на всех стадиях нагружения образца.

Первичные результаты испытаний. Во время проведения экспериментов создается база данных с результатами всех измерений и записями волновых форм. В основе метода выделения отдельного события АЭ лежит пороговый алгоритм. Оценивается амплитуда и длительность каждого единичного события. Происходит определение амплитуды и времени прихода каждого события. Разрешающая способность системы выделения отдельных сигналов составляет до 4000 событий в секунду. Формируется каталог событий с указанием всех определенных параметров.

Отличие представленных экспериментов от испытаний, проведенных ранее другими исследователями: (1) – Большинство экспериментов, проведенных в последние десятилетия на территории России и СНГ (например [6, 7]), не обеспечивало стабильность вибрационного воздействия, имитирующего приливы, достаточную для целей исследования фазовых соотношений «внешнее воздействие – эмиссионный отклик». Точность удержания заданных физических

параметров системой INOVA, таких как сила и перемещение, на порядок превосходит имеющиеся аналоги и позволяет контролировать модулирующее воздействие с высокой точностью, необходимой для решения указанных задач. (2) - В 90-ых годах в США [8] моделирование приливов было выполнено на высоком техническом уровне, эксперименты управлялись программно. Эффект синхронизации интенсивности акустической эмиссии с внешним периодическим воздействием был выявлен при больших (5-10%) вариациях напряжений и деформаций [9]. Однако в природе реальный уровень изменений напряженного состояния составляет доли процентов. В проведенных нами экспериментах впервые удалось достичь соотношения «периодическая деформация - фоновая деформация» порядка 0.1% при одноосном деформировании горной породы, что близко к природным условиям.

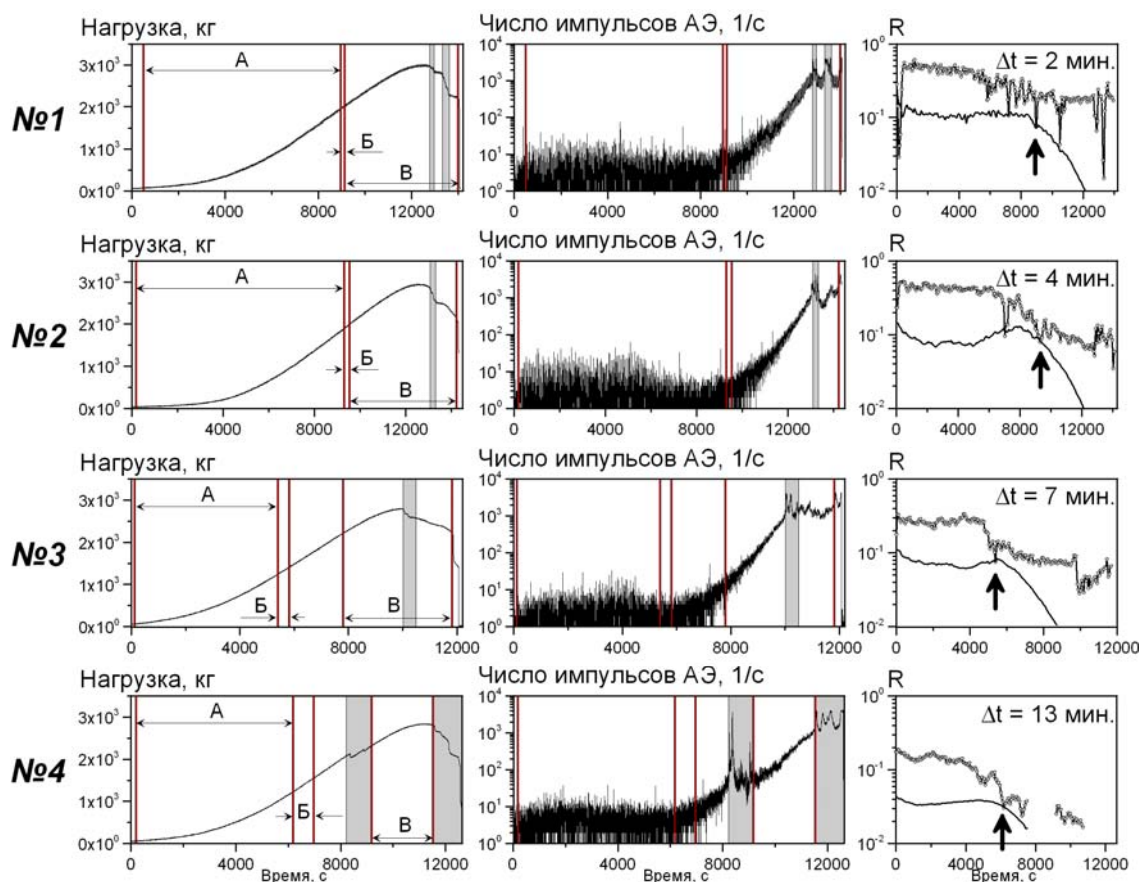


Рис.1. Четыре эксперимента с различной амплитудой периодической деформации (№1 - $A_e=1.6 \cdot 10^{-5}$, №2 - $8 \cdot 10^{-6}$, №3 - $4 \cdot 10^{-6}$, №4 - $2 \cdot 10^{-6}$). Слева: временной ход нагрузки пресса. Центр: временная плотность импульсов АЭ. Справа: временной ход параметра R в скользящем окне указанной величины (сплошная линия - R_{cr}). Вертикальными линиями отмечены три стадии отклика АЭ на периодическое воздействие – А, Б, В. Серые сегменты отмечают интервалы, исключенные из обработки из-за переполнения канала регистрации потока АЭ.

Результаты. Форма нагрузочной кривой является типичной для сжатия горных пород и приведена на рис.1 для демонстрации положения выявленных участков характерного поведения АЭ. Во временном ходе числа импульсов АЭ в единицу времени N выделяются этапы стабильного уровня АЭ, экспоненциального увеличения уровня АЭ и максимальных значений АЭ.

Для выявления эффекта синхронизации АЭ периодическим воздействием применялась процедура, основанная на критерии равномерности Рэля $R < R_{cr}$ [10], где

$$R = \frac{1}{n} \sqrt{\left(\sum_i \cos(2\pi t_i / T) \right)^2 + \left(\sum_i \sin(2\pi t_i / T) \right)^2}, \quad R_{cr} - \text{критическое значение } R \text{ с уровнем значимости } 0.01.$$

Подразумевается равномерность распределения импульсов АЭ по фазе внешнего воздействия в интервале от 0 до 2π . T - период воздействия, t_i – время возникновения i -го импульса АЭ, n – число анализируемых импульсов АЭ. Расчеты R показали, что в каждом эксперименте существуют временные интервалы, когда наблюдается синхронизация АЭ с меандром деформации, т.е. $R > R_{cr}$, –

интервалы А и В (Рис.1), а между ними выявлен участок отсутствия синхронизации, т.е. $R < R_{cr}$. Этот интервал попадает на линейный участок нагрузочной кривой (Рис.1, интервал Б), и именно после него начинается экспоненциальное увеличение потока АЭ. Отметим различную длительность интервала Б - увеличивающуюся с уменьшением амплитуды меандра от 2 мин. (эксперимент №1) до 13 мин. (эксперимент №3) Графики временного хода R проявляют еще одну особенность: в начале эксперимента значение R достаточно стабильно, затем уменьшается до незначимых величин (интервал Б), после чего опять меняется незначительно. Это допускает постоянство формы отклика на участках А и В и ее изменение при переходе через интервал Б.

Для определения характерной формы периодического отклика АЭ использована методика Бюй-Балло: $\bar{N}(t) = \sum_{i=0}^{n-1} N(t+iT) / n$, где n – число осредняемых периодов T . Для обеспечения равномерного вклада в процедуру осреднения участков с различным уровнем АЭ предварительно сделана нормировка $N(t)$ на среднее значение в окрестности t шириной $\Delta t = 2$ мин. Наиболее целесообразна эта процедура для участков экспоненциально растущего потока АЭ.

На стадии А (Рис.1) выделенные максимумы АЭ (Рис.2) соответствуют по времени приращению деформации. Наибольший всплеск АЭ совпадает с положительным фронтом меандра подгрузки, а более слабые пики – приращению фоновой деформации. Роль последних возрастает в последовательных экспериментах с уменьшением амплитуды меандра подгрузки. После каждого всплеска наблюдается релаксирующий спад, подобный афтершоковому режиму в сейсмичности. Очевиден пониженный уровень АЭ при отрицательном значении меандра подгрузки в экспериментах №№1-3.

Совершенно другая форма отклика АЭ наблюдается на стадии В (Рис.2): она близка прямоугольной форме меандра подгрузки. При положительном значении меандра отклик АЭ находится на постоянном уровне (в пределах отмеченного доверительного интервала), превышающем средний уровень на 10-30% в зависимости от амплитуды меандра. При отрицательном значении меандра уровень АЭ симметрично снижается на те же 10-30%. Особенностью данного режима является быстрый переход АЭ с нижнего уровня на верхний после положительного фронта меандра и сравнительно медленный переход на нижний уровень через полпериода меандра. Причем, с уменьшением амплитуды меандра время перехода АЭ на нижний уровень существенно возрастает, достигая $T/6 = 10$ с. Учитывая отсутствие реакции АЭ на изменение фоновой деформации и отсутствие релаксации после прохождения положительного фронта меандра подгрузки, можно предположить принципиальное различие в механизмах формирования периодического отклика АЭ на стадиях А и В. Косвенно существование различных механизмов подтверждается быстрым переходом от одной формы отклика к другой и наличием пограничной зоны (стадия Б), где не наблюдается никакой периодичности АЭ.

Ранее в работе [11] при поэтапном (с паузами) линейном росте напряжения были обнаружены смещения максимума АЭ на различных участках нагружения образца. Однако, можно отметить, что этот эффект носил количественный характер, в то время как поведение АЭ в интервалах А и В в условиях добавления периодической компоненты нагрузки отличается на качественном уровне.

Выводы. Главным результатом проведенных экспериментов в настоящее время мы считаем обнаружение стадийности в акустическом отклике разрушаемого образца на слабое периодическое внешнее воздействие. Причем различные стадии связываются с различными состояниями образца в процессе разрушения.

В каждом эксперименте наблюдалась нестабильность отклика АЭ: на начальном участке (А) можно говорить о синхронизации АЭ и периодического воздействия («афтершоковый» режим), затем на участке упругой деформации (Б) синхронизация отсутствует и появляется снова на участке пластической деформации (В). Выявлены различия в форме отклика АЭ на начальном участке (А) и при пластической деформации (В).

Выявленная стадийность может рассматриваться как аналог нестабильности приливной модуляции сейсмических шумов в сейсмоактивном регионе [4], что косвенно обосновывает использование приливно-откликового метода для мониторинга напряженного состояния среды.

Благодарности. Авторы благодарят д.ф.-м.н. А.В. Пономарева за интерес к работе и содействие в организации совместных лабораторных исследований. Исследования проводятся при поддержке РФФИ (Грант 08-05-00692-а).

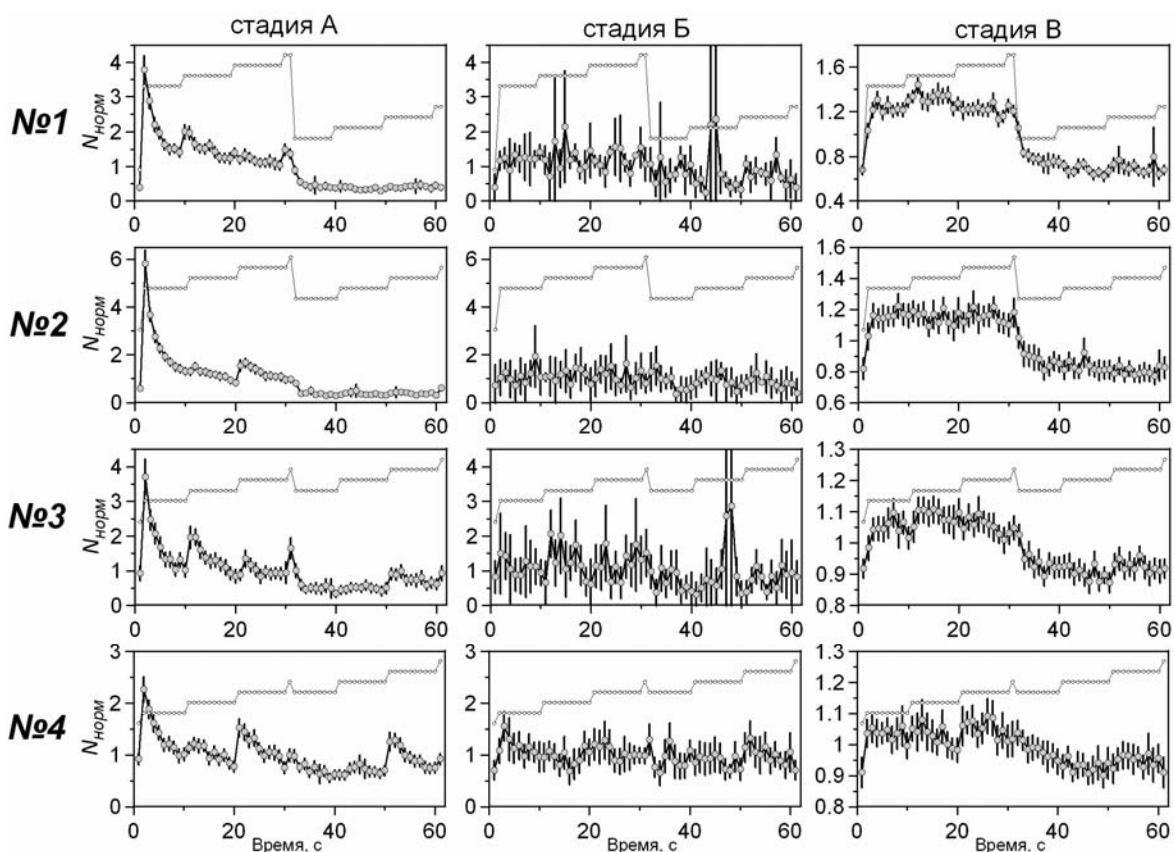


Рис.2. Нормированное число импульсов АЭ (среднее значение, 2σ доверительный интервал) на трех стадиях отклика АЭ на периодическое ($T=60$ с) модулирующее воздействие (схематично показано на каждом графике). Границы стадий отмечены на Рис.1.

Список литературы

1. Рыкунов Л.Н., Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В. Явление модуляции высокочастотных сейсмических шумов Земли // Открытия в СССР в 1983 г. М.: ВНИИПИ, 1984. С.46.
2. Гордеев Е.И., Салтыков В.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н. К вопросу о связи высокочастотного сейсмического шума с лунно-солнечными приливами // Докл. РАН. 1995. Т.340. №3. С.386-388.
3. Рыкунов Л.Н., Салтыков В.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н. Характерные параметры высокочастотного сейсмического шума перед сильными камчатскими землетрясениями 1996 г. // Докл. РАН. 1998. Т.361. №3. С.402-404.
4. Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н. Предвестники сильных землетрясений на Камчатке по данным мониторинга сейсмических шумов // Вулканология и сейсмология. 2008. №2. С.110-124.
5. Патонин А.В. Геофизический комплекс INOVA: методика и техника лабораторного эксперимента // Сейсмические приборы. 2006. Вып.42. С. 23-30.
6. 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.
7. Манжиков Б.Ц. Синхронизация акустической эмиссии при деформировании горных пород в поле низкочастотных вибраций // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород. Материалы 1-ой Международной школы-семинара. Красноярск, 9-15 сентября 2001. Красноярск. 2002. С.42-47.
8. Lockner D.A., Beeler N.M. Premonitory slip and tidal triggering of earthquakes. // Journal of Geophysical Research - Solid Earth. Journal of Geophysical Research - Solid Earth. 1999. V.104. N B9. doi: 10.1029/1999JB900205.
9. Ponomarev A.V., Smirnov V. B., Stroganova S. Synchronization of acoustic flow by external force in laboratory experiment // 11th International Symposium on Natural and Human Induced Hazards & 2nd Workshop on Earthquake Prediction, June 22-25, 2006, Patras, Greece. Abstract volume. P.94.
10. Чини Р.Ф. Статистические методы в геологии. М.: Мир. 1986. 189 с.
11. Sobolev G.A., Babichev O.V., Los V.F. et al. Precursors of Destruction of Water-Containing Blocks of Rock // Journal of Earthquake Prediction Research. 1996. V.5. P.63-91.