

К РАЗРАБОТКЕ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРИЛИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СЕЙСМИЧЕСКУЮ ЭМИССИЮ ON PHYSICAL MODEL OF TIDAL INFLUENCE ON SEISMIC EMISSION

Салтыков В.А.¹, Зайцев В.Ю.², Кугаенко Ю.А.¹, Матвеев Л.А.², Патонин А.В.³

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

² Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород

³ Геофизическая обсерватория «Борок» Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, пос. Борок Ярославской обл.

The aim of this report is investigation of opportunity to monitor stress state of medium by use of variations of the high-frequency seismic noise (HFSN) parameters connected with tidal influence. While our long-term study of HFSN, the tidal modulation of HFSN and synchronization between HFSN tidal component and gravitational potential was detected. The main question: what physical mechanism can supply the synchronization and observed depth of modulation?

Test series for model rock samples (sandstone) was carried out for uniaxial and uniform compression and various modulatory influences. It is found that acoustic emission is changing with modulatory period in certain parts of loading. Different stages of AE response are connected with different state of rock samples during loading and destruction. The model of the effect "HFSN modulation by tides" was developed on the base of mechanism of nonhysteretic amplitude-depended dissipation. Numerical estimations correspond to nature observations. During last year the geometry of fissures was taken into account. The proposed model explains some (phase and spectral) features of observed HFSN modulation.

Исследование направлено на обоснование возможности контроля напряженно-деформированного состояния среды при подготовке сильных землетрясений по параметрам приливных вариаций фоновой сейсмичности и высокочастотного сейсмического шума (ВСШ). Под ВСШ понимаются сейсмические осцилляции в частотном диапазоне первых десятков Гц с амплитудами около 10^{-9} - 10^{-12} м. Важнейшим этапом в исследованиях сейсмических шумов в диапазоне 10-60 Гц является обнаружение их модуляции естественными деформирующими процессами: собственными колебаниями Земли, земными приливами и пр. Этот факт был зафиксирован в 1983 г. как научное открытие [1]. Оно имело принципиальное значение, так как обнаруженная модуляция микросейсмического излучения деформирующими процессами подтвердила наличие в сейсмических шумах эндогенных составляющих, что вывело их из разряда помех и позволило рассматривать как самостоятельное информативное явление.

Несмотря на более чем 25-летнюю историю исследования эффекта приливной модуляции ВСШ [1-3], до сих пор не было предложено убедительной физической интерпретации этого эффекта. Существует гипотеза [4] о возможности развития в сейсмически активных районах протяженных (с линейными размерами до нескольких сотен километров) приповерхностных зон дилатансии и активизации трещин, однако остается открытым вопрос: какие именно физические механизмы могут обеспечить появление наблюдаемой глубины модуляции ВСШ на уровне нескольких процентов и выше за счет весьма слабых приливных деформаций, не превышающих 10^{-8} . Поэтому одной из задач данного проекта является развитие физических моделей такого рода, опирающихся как на собственно натурные наблюдения приливной модуляции ВСШ, так и современные экспериментальные и теоретические результаты, полученные в смежных областях геофизики и нелинейной акустики.

Проведена серия испытаний на модельных образцах горных пород (песчаник) в условиях всестороннего и одноосного сжатия при меняющихся параметрах модулирующего воздействия и «фоновой» нагрузки (рис. 1). В качестве основного инструмента используется программно-управляемая электрогидравлическая система INOVA, позволяющая проводить полномасштабные эксперименты по изучению процессов разрушения горных пород.

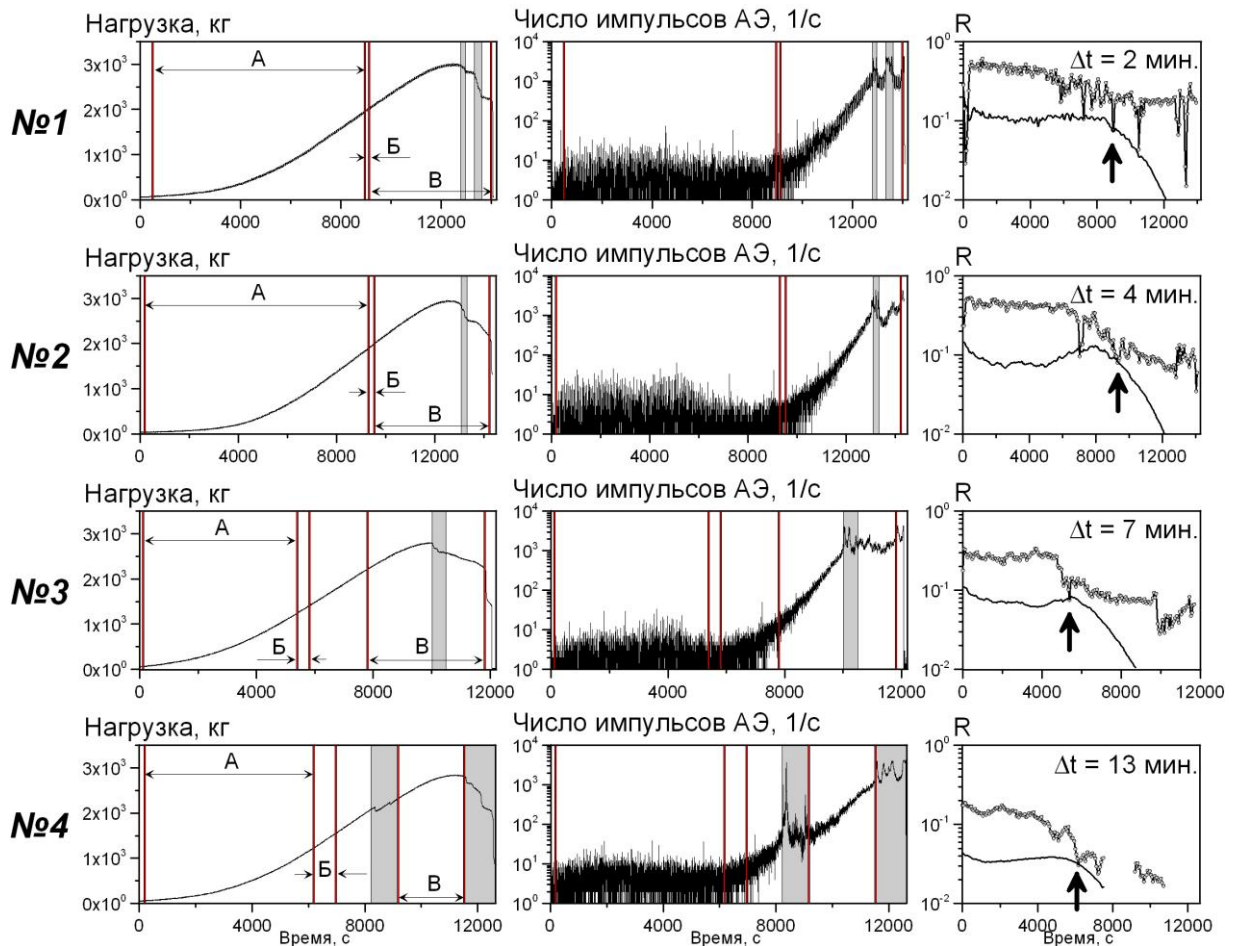


Рис.1. Четыре эксперимента с различной амплитудой периодической деформации (№1 - $A_e = 1.6 \cdot 10^{-5}$, №2 - $8 \cdot 10^{-6}$, №3 - $4 \cdot 10^{-6}$, №4 - $2 \cdot 10^{-6}$). Слева: временной ход нагрузки пресса. Центр: временная плотность импульсов АЭ. Справа: временной ход параметра R в скользящем окне указанной величины (сплошная линия - $R_{ст}$). 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.

Отличие представленных экспериментов от испытаний, проведенных ранее другими исследователями:

- 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;

- в проведенных нами экспериментах впервые удалось достичь соотношения «модулирующая деформация – фоновая деформация» порядка 0.1% при одноосном деформировании горной породы. Ранее эффект синхронизации интенсивности АЭ с внешним периодическим воздействием был выявлен при больших (5-10%) вариациях напряжений и деформаций [5, 6].

В ходе лабораторного моделирования обнаружены участки изменения акустической эмиссии (АЭ) с периодом модулирующего воздействия. Выявлены участки различного поведения акустической эмиссии, что связывается с несколькими стадиями напряженно-деформированного состояния образца [7]. В частности, показаны различная форма отклика АЭ на периодическое воздействие на начальном и конечном этапе нагружения, а также существование интервала, на котором модуляция АЭ отсутствует (рис.2). Причем с уменьшением амплитуды модулирующего воздействия длительность этого интервала увеличивается.

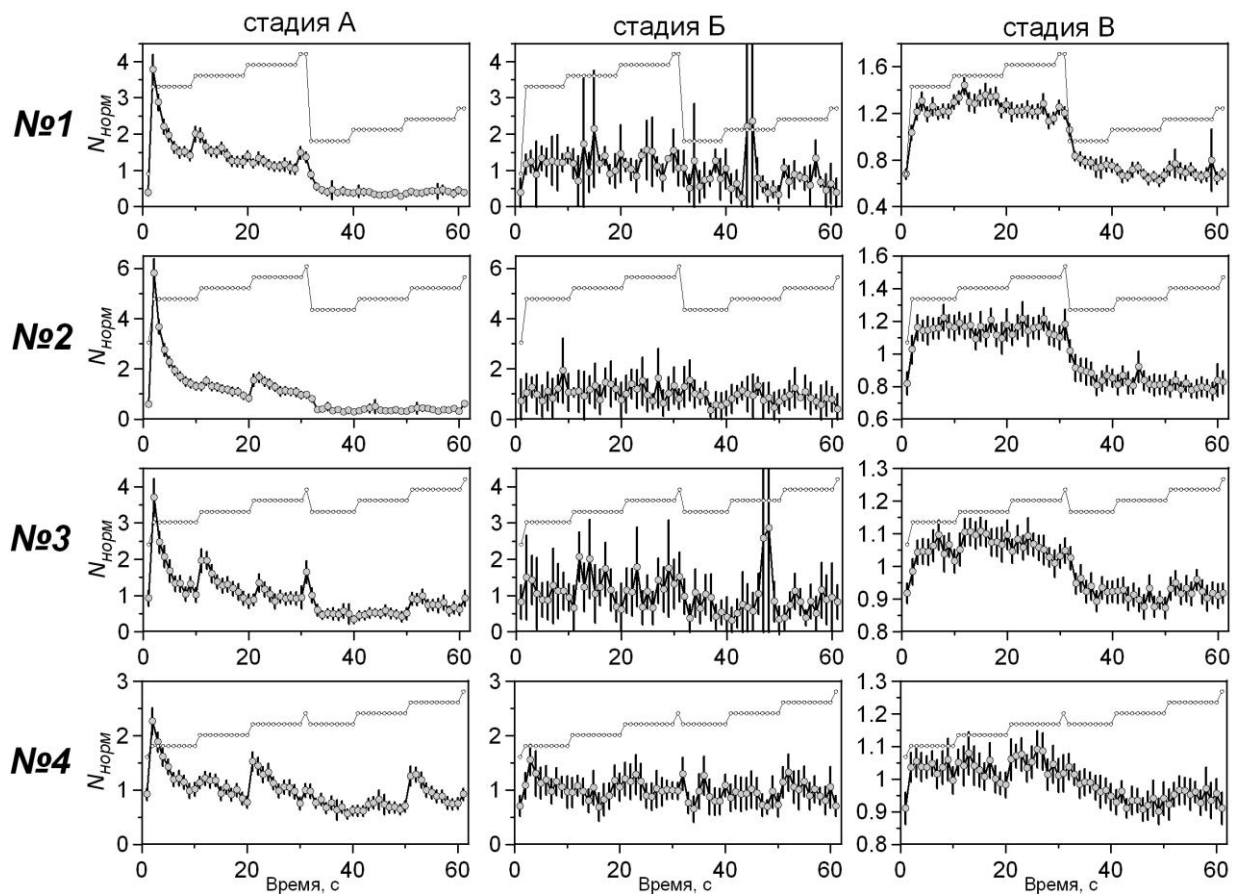


Рис.2. Нормированное число импульсов АЭ (среднее значение, 2σ доверительный интервал) на трех стадиях отклика АЭ на периодическое ($T=60$ с) модулирующее воздействие (схематично показано на каждом графике).

Горные породы являются типичным примером материала с мезоструктурой, характерный масштаб которой превышает атомарный, но является значительно меньшим, чем характерные длины упругих волн в материале. Предложен механизм приливной модуляции ВСШ на основе модели среды реологического уровня (рис. 3), рассмотрена физическая модель амплитудно-зависимого поглощения [8]. Проведен анализ важного для распространения малоамплитудных сейсмических волн вида потерь энергии за счет термоупругого поглощения на трещинах с учетом неровности их поверхностей.

Развитые в последние годы модели показывают, что в мезоскопических материалах (в т.ч. горных породах) уровень акустической нелинейности может быть значительно (в сотни и тысячи раз) выше, чем уровень обычной решеточной упругой нелинейности, характерной для идеальных кристаллов и однородных аморфных материалов. В частности, при правдоподобных предположениях о параметрах и концентрации трещин развитые модельные представления хорошо согласуются с известными экспериментальными данными по приливной модуляции сейсмических волн, создаваемых высокостабильными сейсмическими источниками. При этом удастся согласованно интерпретировать не только наблюдаемую модуляцию скоростей, но и амплитуд сейсмических волн. Такое сопоставление можно рассматривать как «калибровку» параметров модели по независимому приливному эффекту для дальнейшего применения к задаче интерпретации приливных вариаций эндогенных сейсмических шумов (таблица). В частности, оценки, полученные на основе такого рода «откалиброванной» модели, показывают, что приливные модуляции способны вызывать относительные изменения декремента горных пород на уровне $10^{-1}..10^{-2}$. Даже в предположении стационарности собственно источников эмиссии шума (который, по-видимому, должен определяться, прежде всего, фоновыми напряжениями в земной коре) оценки показывают, что при этом за счет влияния приливных деформаций можно ожидать вариаций уровня ВСШ также порядка $10^{-1}..10^{-2}$, что хорошо согласуется с данными наблюдений.

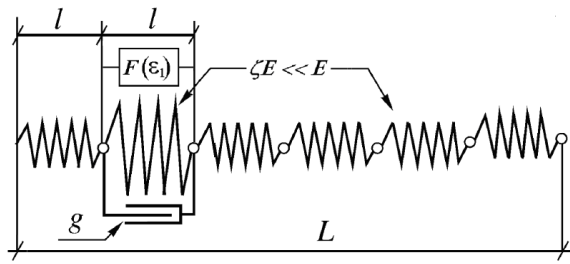


Рис. 3. Реологическая модель микронеоднородной упругой среды с мягкими дефектами. Функция $F(..)$ и параметр g описывают их упругую нелинейность и эффективную вязкость. Количество дефектов характеризуется их погонной концентрацией $\nu = l/L$ в одномерном случае или относительным объемным содержанием при обобщении на трехмерный случай.

Таблица. Глубина модуляции уровня ВСШ приливными процессами

Тип волны	Станция «Начики», Южная Камчатка	Станция «Карымшина», Южная Камчатка	Станция «Шикотан» Малая Курильская гряда	Станция «Эримо», о. Хоккайдо, Япония
O_1	(8.0±2.1)% 114	(5.9±1.0)% 639	(3.5±1.0)% 241	(1.7±0.3)% 298
Q_1	(7.3±1.6)% 300	(1.9±1.0)% 347	(2.7±0.9)% 328	(1.6±0.5)% 103
M_2	(5.6±1.6)% 103	(5.3±0.8)% 502	(1.8±0.5)% 194	(0.82±0.22)% 89
N_2	(4.6±1.4)% 163	(2.9±1.0)% 317	(1.7±0.6)% 394	(1.8±0.4)% 181

Примечание. Курсивом показана продолжительность интервала данных (в сутках) при выделении приливных компонент уровня ВСШ.

На основе предложенной модели помимо подтверждения согласующихся с наблюдениями количественных оценок удастся предложить объяснение и характерным качественным (фазовым и спектральным) особенностям наблюдаемой модуляции сейсмических шумов.

Литература

1. Рыкунов Л.Н., Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В. Явление модуляции высокочастотных сейсмических шумов Земли // «Открытия в СССР в 1983 г.». Москва. 1984. ВНИИПИ. С.46.
2. Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н. 20 лет исследованию сейсмических шумов на Камчатке: от экспериментальных наблюдений к прогнозу землетрясений и моделированию // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2007. №1. Вып.9. С.37-50.
3. 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
4. Алексеев А.С., Белоносов А.С., Петренко В.Е. О концепции многодисциплинарного прогноза землетрясений с использованием интегрального предвестника // Проблемы динамики литосферы и сейсмичности. Вычислительная сейсмология. Вып.32. М.:ГЕОС. 2001. С.81-97.
5. 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.
6. 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.
7. Салтыков В.А., Патонин А.В. Стадийность акустической эмиссии при лабораторном моделировании приливных эффектов в сейсмичности // Доклады РАН. 2010. Том 430. №5. С.693-696.
8. Зайцев В. Ю., Салтыков В.А., Матвеев Л. А. Амплитудно-зависимые потери в микронеоднородных средах, не связанные с гистерезисной нелинейностью, и эффект приливной модуляции сейсмических шумов // Акустический журнал. 2008. т. 54. № 4. С.621-628.