

**ЛУННО-СОЛНЕЧНЫЕ ПРИЛИВЫ В ВАРИАЦИЯХ
СЕЙСМОАКУСТОЭМИССИОННЫХ ПРОЦЕССОВ: СОПОСТАВЛЕНИЕ
РЕЗУЛЬТАТОВ РЕЖИМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И ЛАБОРАТОРНОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**LUNA - SOLAR TIDES IN SEISMIC AND ACOUSTIC EMISSION: COMPARISON OF
THE OPERATION OBSERVATIONS RESULTS WITH LABORATORY MODELING**

Ю.А. Кугаенко, В.А. Салтыков

Камчатский филиал Геофизической службы РАН

Earth tides are a unique natural process: they act upon the whole Earth and have stable time parameters. This stability permits to use them as natural calibrator for study of geophysical fields anomalies connected with variations of medium stress state. Results of seismic noise monitoring are presented in the given report. Controlling of noise envelope component with period of O_1 tidal wave is the base of monitoring. By experimental data obtained in Kamchatka stable synchronization of the HFSN with tides before large local earthquakes was revealed. The same effects were detected in laboratory experiments during the pre-fracturing and destruction processes modeling under constant strain rate and weak vibrations. The review of published results of laboratory tidal modeling is presented. Some examples of field experiments with vibrators, when tidal effects were detected, are shown in the presentation. Phenomenological model for seismic noise synchronization with gravity potential before earthquakes is demonstrated.

Введение

Гравитационное воздействие Луны и Солнца рассматривается как природный эталон деформирующих сил, имеющий точное математическое описание, идеально прогнозируемый во времени и пространстве и действующий в глобальном масштабе. Изучение явлений, связанных с деформацией земной коры под влиянием лунно-солнечных приливов, составляет одну из фундаментальных задач геофизики. Среда подвергается их мощному детерминированному периодическому воздействию, в результате чего также периодически изменяются ее параметры (электропроводность, упругость, вязкость, флюидонасыщенность, активность сейсмической и акустической эмиссии и пр.). Вариации этих параметров отражают динамику геофизических полей в верхних слоях коры, и, следовательно, могут содержать информацию о структуре и состоянии земных недр.

В докладе представлены результаты мониторинга сейсмических шумов на Камчатке на основе контроля приливной компоненты уровня шумов с периодом волны O_1 . Перед сильными землетрясениями зафиксирована синхронизация приливных компонент сейсмических шумов с гравитационным потенциалом. Аналогичные эффекты наблюдались в ходе ряда лабораторных экспериментов при моделировании процессов разрушения и предразрушения при возрастающей нагрузке с наложением слабых вибраций. Приведены примеры лабораторного моделирования приливного воздействия и выявления приливных эффектов в контролируемых полевых экспериментах с вибрационными источниками.

Приливные эффекты в параметрах сейсмического шума

Высокочастотный сейсмический шум (ВСШ), под которым понимаются сейсмические осцилляции с амплитудой $10^{-9} \dots 10^{-12}$ м в частотном диапазоне первых десятков Гц, продолжает оставаться нетрадиционным объектом геофизических исследований, хотя идея о том, что поле сейсмических шумов несет информацию о состоянии среды, привлекает все большее внимание ученых.

В 1983 г. Л.Н. Рыкуновым с соавторами было зафиксировано научное открытие о модуляции сейсмических шумов в диапазоне 10-60 Гц естественными деформирующими процессами: собственными колебаниями Земли, земными приливами и пр. [24]. Оно имело принципиальное значение, так как обнаруженная модуляция микросейсмического излучения деформационными процессами подтверждала наличие в сейсмических шумах эндогенных составляющих, что выводило их из разряда помех и позволяло рассматривать как самостоятельное информативное явление.

С конца 80-х годов на Камчатке ведутся исследования сейсмических шумов в рамках задач, связанных с изучением возможности контроля напряженного состояния среды по изменению параметров геофизических полей. Одной из основных целей этих работ является изучение характеристик ВСШ, его подверженности внешним воздействиям и установление связи ВСШ с длиннопериодными деформационными процессами. За это время организована непрерывная регистрация ВСШ в двух пунктах на Камчатке (станции «Начики», 1992 г., и «Карымшина», 2001 г.); в 2003 г. установлена новая регистрирующая станция на о. Шикотан Малой Курильской гряды; получены данные о структуре ВСШ и факторах, оказывающих влияние на исследуемое поле [11, 23, 26-28].

Наиболее интересным и важным из этих факторов земные приливы. Длительное время вопрос модуляции ВСШ приливами оставался дискуссионным в основном из-за короткой продолжительности анализируемых рядов наблюдений. Долговременные наблюдения ВСШ на Камчатке позволили выявить статистически значимые приливные эффекты в сейсмическом шуме [11, 26]: методом Бюй-Балло [29] получены значимые отклонения в средних значениях ВСШ для различных фаз прилива и выделены периодические составляющие ВСШ с периодами основных приливных волн: O1 (T = 25.82 ч.), K1 (T = 23.93 ч.), P1 (T = 24.07 ч.), Q1 (T = 26.87 ч.), M2 (T = 12.42 ч.), S2 (T = 12.00 ч.), N2 (T = 12.66 ч.). Этим подтверждены существование эндогенной компоненты ВСШ и возможность его модуляции длиннопериодными деформационными процессами.

Основные результаты исследований связи сейсмических шумов с приливами, полученные на Камчатке:

1. Обнаружено важное свойство отклика ВСШ на приливное воздействие: эффект не является стабильным во времени [26-28]. Участки существования приливной компоненты сменяются участками ее отсутствия, меняются амплитудно-фазовые соотношения между волнами прилива и компонентами ВСШ. Этим также объясняется сложность выявления приливных гармоник при анализе данных наблюдений.

2. Выявлена синхронизация выделенной из ВСШ приливной компоненты с гравитационным приливным потенциалом (далее – синхронизация). Этот эффект наблюдался от нескольких недель до 2 месяцев перед сильными сейсмическими событиями на эпицентральной дистанции до 400 км и проявлялся как стабилизация фазового сдвига $\Delta\phi$ между приливной компонентой ВСШ и приливной волной на определенном уровне. На этих интервалах времени отклик ВСШ на приливное воздействие может рассматриваться как устойчивый процесс. Обнаруженный эффект синхронизации процессов лег в основу метода контроля напряженного состояния земной коры для прогноза сильных землетрясений по изменению характера отклика ВСШ на приливное воздействие [21]. Магнитуда ожидаемого землетрясения M связана с эпицентральной дистанцией Δ до точки наблюдения эмпирической зависимостью:

$$M \geq 4.0 + 0.008 \cdot \Delta, \quad \Delta < 400 \text{ км}$$

3. Результаты мониторинга ВСШ показывают устойчивые положительные результаты при выявлении предвестников сильных региональных землетрясений с $M \geq 6.0$: из 21 землетрясений, которые произошли в радиусе до 400 км от станций наблюдения в

1992-2006 г.г., предвестник не был выявлен только в одном случае – для землетрясения 8 марта 1999 г. $M=6,9$. Перед 14 землетрясениями с $M \geq 6,0$, которые произошли в 1994-2006 гг. в 8 случаях предвестник выявлен в режиме реального времени и прогностические заключения своевременно были направлены в соответствующие инстанции. Методика используется при комплексной оценке сейсмической опасности для Камчатки [10].

Интерес к этой проблематике сохраняется. Например, в [4] обсуждаются результаты выявления корреляции фонового уровня сейсмоакустической эмиссии с солнечной компонентой приливной деформации по результатам долговременной регистрации в глубокой скважине. В [13] показано влияние лунно-солнечных приливов на изменение открытой трещиноватости горных пород и уровень акустической эмиссии по данным площадной сейсмической группы.

Физическое обоснование выявленных эффектов

Сейсмический шум является низшим энергетическим уровнем единого сейсмического процесса и, как и землетрясения, связан с разрушением среды и образованием разрывных нарушений, но на микро- и мезоуровнях. Спонтанно возникающие отдельные акты микроразрушения, часто следуя один за другим, сливаются в непрерывный процесс, интенсивность которого зависит от общего напряженного состояния среды, пространственных и временных градиентов напряжений и раздробленности структуры. Каждое такое событие ведет к локальному сбросу напряжений, а весь процесс в целом иллюстрирует тонкую структуру релаксации горных пород и сейсмического течения горных масс на уровне отдельных актов крипа. Сейсмическая эмиссия проявляется особенно сильно в объемах среды, характеризующихся развитыми дефектами структуры и динамической неустойчивостью, вызванной геодинамическими процессами и изменениями напряженного состояния.

По существующим представлениям [17] радиус сбора микросейсмической информации станцией ВСШ на частоте 30 Гц оценивается в 8 км. Станции регистрации ВСШ «Начики» и «Карымшина» удалены от сейсмофокальной зоны более чем на 100 км. Следовательно, зафиксированный нами эффект синхронизации не относится непосредственно к очаговым зонам готовящихся сильных землетрясений, а связан с изменением состояния среды в областях, прилежащих к станции, и имеющих линейные размеры до нескольких километров.

Природа такого значительного дальнего действия при появлении предвестников на расстояниях в несколько сотен километров от очага землетрясения - вопрос дискуссионный и все еще не решенный до конца.

Одним из возможных объяснений изменения тензочувствительности ВСШ в период подготовки сильных землетрясений на большом расстоянии от их очагов может стать гипотеза, разработанная на базе кинетической теории разрушения [12] и подхода [2], в котором рассматриваются процессы развития системы микротрещин и формирования протяженных приповерхностных зон дилатансии и микротрещиноватости. В результате взаимодействия региональных и локальных тектонических сил в сейсмоактивных зонах могут возникать области высокой концентрации тектонических напряжений. Предполагается, что изменение физических и реологических свойств горных пород и аномалии геофизических полей различной природы охватывают области земной коры с линейными размерами десятки и сотни километров, не всегда совпадая с областью готовящегося очага, что было показано авторами работы [2] с помощью математического моделирования. Энергетической средой, в которой осуществляется связь очаговой и приповерхностной зон дилатансии, является единое поле напряжений, создаваемое силами в источнике готовящегося землетрясения. Эмиссионная компонента шумов может

рассматриваться как интегральный отклик на все одновременно воздействующие на регион деформации.

При математическом моделировании эффекта модуляции ВСШ приливным воздействием необходимо отдельно рассмотреть:

- приливные эффекты, обусловленные нелинейностью свойств гетерогенных сред в процессе распространения через них микросейсмического излучения [6];

- действие приливов непосредственно на активность источников сейсмической эмиссии. Совпадение частот инициирующего приливногo воздействия и ведомогo процесса микросейсмического излучения и установление между ними стабильного фазовогo соотношения может рассматриваться как захват фаз и частот внешней силой [22]. По существующим представлениям сейсмический шум (сейсмическая эмиссия) является одним из свойств активной энергонасыщенной геофизической среды, модель которой предложена М.А. Садовским [25]. В соответствии с этой моделью, литосфера рассматривается как открытая, неравновесная, нелинейная, диссипативная динамическая система взаимодействующих между собой отдельных, имеющих различную физико-химическую природу. Система открыта для энергообмена с окружающей средой. Это свойство отражает возможности перераспределять и диссипировать запасенную в ней и вновь поступающую энергию. Следовательно, обнаруженный эффект может рассматриваться как проявление эффекта синхронизации излучения, генерируемого ансамблем микротрещин в некоторой ограниченной области, контролируемой станцией ВСШ, с внешним периодическим воздействием – гравитационным потенциалом.

Можно отметить, что для лабораторных образцов прогнозирование состояния предразрушения практически решено [15]: хорошо известны не только кинетика накопления микротрещин, но и особенности их образования, в частности, триггерный эффект при слабых вибрационных воздействиях [16]. Что касается очагов землетрясений, то имеются определенные трудности, связанные со сложностью объектов и отсутствием данных об истории развития процесса разрушения.

Лабораторное моделирование приливного воздействия

Проявления приливных геодинамических процессов вызывают определенный интерес исследователей и смоделированы в контролируемых лабораторных условиях. Аналогом приливов служили слабые вибрации с малыми амплитудами, много меньше среднего уровня квазистационарного напряжения [1, 7, 8, 18, 19, 30-36]. В ходе экспериментов установлено, что вибрационные воздействия влияют и на кинетику микротрещин в гетерогенных средах, что отмечается как изменение активности акустической эмиссии под действием вибрационных полей. Результаты экспериментов целесообразно учитывать при разработке физического обоснования обнаруженного эффекта синхронизации выделенной из ВСШ приливной компоненты с гравитационным приливным потенциалом.

Ниже приведен ряд экспериментальных результатов, наиболее важных для понимания физических механизмов формирования отклика сейсмической эмиссии на приливное воздействие.

1. Установлено, что степень воздействия вибраций на нагруженные образцы горных пород [7, 8, 30, 31] зависит от величины изначально приложенного напряжения. Нагрузки, при которых удалось наблюдать АЭ при слабых вибрациях, соответствуют дилатансионной стадии деформации.

2. Показано, что энергия, затрачиваемая на генерацию единичного акустического импульса, по мере увеличения нагрузки (до разрушения образца) уменьшается примерно на три порядка [1].

3. Синхронизирующий эффект вибраций доказан в экспериментах при внешнем периодическом слабом нагружении, имитирующем приливы [18, 32, 35, 36].

4. Были обнаружены нелинейные эффекты вибрационного влияния: временная задержка эмиссионной реакции среды и последствие [7, 30]. Время задержки реакции на действие вибраций может сильно различаться для различных материалов и условий нагружения. Они малы для пластических материалов и довольно высоки для горных пород, где велика роль трещинообразования.

Как теоретические представления о возможном развитии дилатансионных зон, так и результаты лабораторного моделирования акустоэмиссионных процессов согласуются с экспериментально полученными данными об особенностях сейсмоэмиссионного отклика на приливы в интервалах времени, предшествовавших сильным землетрясениям.

Эксперименты с вибраторами

Эксперименты с вибрационными источниками можно рассматривать как промежуточный класс работ между лабораторным моделированием и исследованиями сейсмических сигналов в естественных условиях. Речь идет об использовании контролируемого источника сигнала, имеющего фиксированные характеристики и регулируемое время воздействия на естественную среду.

Колебания влияют на физико-механические свойства горных пород и способствует переходу от хрупкого разрушения к пластической деформации через релаксационные процессы, в частности, через микросейсмическое излучение. Инициирование микросейсмического излучения вибровоздействием в естественных условиях рассмотрено, например, в работах [3, 5, 20]. Эти и другие эксперименты подтвердили, что среда обладает виброчувствительностью, что проявляется в возбуждении микросейсмической активности вибросигналом.

Колебательный во времени характер макроструктуры открытой трещиноватости (интенсивности сейсмической эмиссии) под действием лунно-солнечных приливов по данным рассеянных волн был показан при применении технологии «Сейсмолокация бокового обзора – СЛБО» [14]. Метод предусматривает использование вибрационного источника.

Приливные эффекты, связанные с изменением характеристик среды в процессе распространения через нее сейсмических волн, были выявлены в экспериментах, представленных ниже.

Результаты вибрационного мониторинга, целью которого было выявление малых вариаций пространственно-временных характеристик волнового сейсмического поля и установление их связи с приливыми деформационными процессами, приведены в [9]. Регистрация сигналов проводилась на значительном расстоянии от источника (высокостабильного вибратора) – 430 и 356 км. Обнаруженные вариации параметров с периодами 12 и 24 часа свидетельствуют о периодическом изменении свойств среды (в частности, скоростей сейсмических волн) под действием геодеформационных процессов, вызванных приливами.

Амплитудно-фазовая модуляция сейсмоакустической волны под действием лунно-солнечного прилива исследована при скважинных экспериментах с применением заглубленного пьезокерамического излучателя [6]. Эффекты фазовой и амплитудной модуляции упругой волны связываются с реактивной (упругой) и диссипативной (неупругой) нелинейностью горных пород, приводящей, соответственно, к модуляции скорости (или фазы) и коэффициента затухания (или амплитуды) сейсмоакустической волны, распространяющейся в массиве горной породы, подверженной квазистатической деформации.

Заключение

Как результаты ведущихся на Камчатке долговременных наблюдений ВСШ, так и результаты лабораторных экспериментов хорошо согласуются между собой. Разрабатываемые на этой экспериментальной базе модельные представления о механизме модуляции ВСШ земными приливами является важной частью научно-методических основ мониторинга ВСШ. Они выводит используемую для прогноза методику из ряда чисто эмпирических зависимостей и повышает обоснованность прогнозирования.

Работы по экспериментальным исследованиям ВСШ на Камчатке и моделированию приливного отклика ВСШ поддержаны Российским фондом фундаментальных исследований (грант 07-05-00225).

Список литературы

1. Авагимов А.А., Зейгарник В.А., Ключкин В.Н. О структуре акустической эмиссии модельных образцов при внешнем энергвоздействии // Физика Земли. 2006. №10. с. 36-42.
2. 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.
3. Беляков А.С., Гамбурцев А.Г., Лавров В.С., Николаев А.В., Приваловский Н.К. Иницирующие вибровоздействия и сейсмическая эмиссия горных пород. // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1996. № 2. С.68-74.
4. Беляков А.С., Лавров В.С., Николаев А.В., Худзинский Л.Л. О синхронизации сейсмоакустической эмиссии с деформацией верхней части земной коры // ДАН. 2006. Т.406. №5. с. 687.
5. Берестнев И.А., Николаев А.В. Изучение прохождения длительных вибросигналов через геофизическую среду // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1990. № 1. С.86-89.
6. Боголюбов Б.Н., Лобанов В.Н., Назаров В.Е., Рылов В.И., Стромков А.А., Таланов В.И. Амплитудно-фазовая модуляция сейсмоакустической волны под действием лунно-солнечного прилива // Геология и геофизика. 2004. Т.45. №8. с. 1045-1049.
7. Богомолов Л.М., Манжиков Б.Ц., Сычев В.Н., Трапезников Ю.А., Щелочков Г.Г. Виброупругость, акустопластика и акустическая эмиссия нагруженных горных пород // Геология и геофизика. 2001. Т.42. №10. С.1678-1689.
8. Богомолов Л.М., Сычев В.Н., Ильичев П.В. Феноменологическая модель потока возбужденных эмиссионных сигналов геосреды // Физика Земли. 2006. №9. С.71-80.
9. Глинский Б.М., Ковалевский В.В., Хайретдинов М.С. Вибросейсмический мониторинг сейсмоопасных зон // Вулканология и сейсмология. 1999. №6. С. 60-64.
10. Гордеев Е.И., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К. Предвестники камчатских землетрясений (по материалам Камчатского отделения Федерального центра прогнозирования землетрясений, 1998-2004 гг.) // Вулканология и сейсмология. 2006. №4. С. 3-13.
11. 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.
12. Журков С.Н. Кинетическая концепция прочности твердых тел. // Вестник АН СССР. 1968. №3. С.46-52
13. Кузнецов О.Л., Чиркин И.А., Жуков А.С., Волков А.В. Влияние лунно-солнечных приливов на изменение открытой трещиноватости нефтегазовых резервуаров и прикладное значение этого эффекта // Геоинформатика. 2006. №10.
1. Кузнецов О.Л., Чиркин И.А., Курьянов А.Ю., Рогоцкий Г.В., Дыбленко В.П. Сейсмоакустика пористых и трещиноватых геологических сред. Экспериментальные исследования. М.: ВНИИгеосистем, 2004. – 362 с.
2. Куксенко В.С. Диагностика и прогнозирование разрушения крупномасштабных объектов // Физика твердого тела. 2005. Т.47. №5. С.788-792.

3. Куксенко В.С., Манжиков Б.Ц., Тилегенов К., Шатемиров Ж.К., Эмильбеков Б.Э. Триггерный эффект слабых вибраций в твердых телах // *Физика твердого тела*. 2003. Т.45. №12. С.2182-2186.
4. Лутиков А.И. Оценка эффективного радиуса влияния источников эндогенного микросейсмического шума // *Вулканология и сейсмология*. 1992. № 4. С.111-115.
5. 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.*
6. Мирзоев К.А., Виноградов С.Д., Рузибаев З. Влияние микросейсм и вибраций на акустическую эмиссию // *Физика Земли*. 1991. №12. С.69-72.
7. Николаев А.В. Проблемы наведенной сейсмичности. // *Наведенная сейсмичность*. М.: Наука. 1994. С.5-15.
8. Пат. 2105332 Российская Федерация. Способ контроля напряженного состояния земной коры для прогноза сильных землетрясений / Салтыков В.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н. № 94042027/25 Заявл. 23.11.94. Опубл. 20.02.98. Бюл. № 5.
9. Пиковский А., Розенблум М., Куртс Ю. Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление. М.: Техносфера, 2003. 496 с.
10. 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. Том 361. №3. С.402-404.
11. Рыкунов Л.Н., Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В. Явление модуляции высокочастотных сейсмических шумов Земли // «Открытия в СССР в 1983 г.» . М. 1984. ВНИИПИ. С.46.
12. Садовский М.А. Избранные труды: Геофизика и физика взрыва. – М.: Наука, 2004. – 440 с.
13. Салтыков В.А. Особенности связи высокочастотного сейсмического шума и лунно-солнечных приливов // *Докл. РАН*. 1995. Т.341. №3. С.406-407
14. Салтыков В.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н. Вариации приливной компоненты высокочастотного сейсмического шума в результате изменений напряженного состояния среды // *Вулканология и сейсмология*. 1997. №4. С.73-83.
15. Салтыков В.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н. Изучение высокочастотного сейсмического шума по данным режимных наблюдений на Камчатке // *Известия РАН. Физика Земли*. 1997. №3. С.39-47.
16. Серебrenников М.Г., Первозванский А.А. Выявление скрытых периодичностей. – М.: Наука. 1965. –244 с.
17. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. – М.: Наука. 2003. – 270 с.
18. Трапезников Ю.А., Манжиков Б.Ц., Богомолов Л.М. Влияние слабых вибраций на деформирование горных пород при постоянной нагрузке // *Вулканология и сейсмология*. 2000. №1. С.66-71.
19. Beeler N. M. and Lockner D. A. Why earthquakes correlate weakly with the solid Earth tides: Effects of periodic stress on the rate and probability of earthquake occurrence // *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*. 2006. V.108. N B8. doi: 10.1029/2001JB001518
20. Byerlee J. Friction of rocks // *Pure App. Geophysics*. 1978. V 166. pp. 615-625.
21. Marone C. Laboratory-derived friction laws and their application to seismic faulting // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 1998. V. 26. pp. 643-696.
22. Lockner D. A. and Beeler N. M. Premonitory slip and tidal triggering of earthquakes. // *Journal of Geophysical Research - Solid Earth*. 1999. V.104. N B9. doi: 10.1029/1999JB900205.
23. 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.