

УДК 550.343

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ АКУСТОЭМИССИОННЫЙ ЭФФЕКТ

Ю.В. Марапулец

Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
684034, Камчатский край, п. Паратунка, ул. Мирная, 7

E-mail: marpl@ikir.ru

С 1999 г. на Камчатском полуострове проводится комплексный мониторинг акустической эмиссии в звуковом диапазоне частот. В ходе исследований установлено существование акустоэмиссионного эффекта в осадочных породах, заключающегося в росте интенсивности геоакустического излучения в частотном диапазоне от сотен герц до первых десятков килогерц при увеличении скорости деформации породных массивов. Эффект устойчиво наблюдается на нескольких пространственно разнесенных станциях и наиболее сильно проявляется на заключительной стадии подготовки землетрясений. Во время акустоэмиссионного эффекта возникает ярко выраженная анизотропия направленности геоакустического излучения, которая обусловлена ориентацией источников акустических колебаний в поле напряжений приповерхностных осадочных пород.

Ключевые слова: деформация, скорость деформации, высокочастотный акустоэмиссионный эффект

© Марапулец Ю.В., 2015

MSC 86A15

HIGH-FREQUENCY ACOUSTIC EMISSION EFFECT

Yu.V. Marapulets

Institute of Cosmophysical Researches and Radio Wave Propagation Far-Eastern Branch,
Russian Academy of Sciences, 684034, Kamchatskiy Kray, Paratunka, Mirnaya st., 7,
Russia

E-mail: marpl@ikir.ru

Complex monitoring of acoustic emission (AE) in the sound frequency range has been carried out in the Kamchatka peninsular since 1999. In the course of the investigation, the existence of acoustic emission effect in sedimentary rocks was detected. It consists in the increase of geoacoustic radiation intensity in the frequency range from hundreds of hertz to the first tens of kilohertz during the growth of rock mass deformation rate. This effect was stably observed at several spaced stations and appears the most vividly at the final stage of earthquake preparation. During the acoustic emission effect, clear anisotropy of geoacoustic radiation directivity occurs which is determined by the source orientation of acoustic oscillations in the stress field of near surface sedimentary rocks.

Key words: deformation rate, high-frequency acoustic emission effect

© Marapulets Yu. V., 2015

Введение

Акустическая эмиссия (АЭ) – излучение упругих волн, возникающее в процессе локальной динамической перестройки внутренней структуры твердых тел. Основными источниками АЭ являются процессы пластической деформации, связанные с появлением, движением и исчезновением дефектов кристаллической решетки, возникновением и развитием микро- и макротрещин, а также трение, в том числе «берегов» трещины друг о друга. Явление акустической эмиссии наблюдается в широком диапазоне масштабов и соответствующих им длинам волн излучаемых колебаний. Можно выделить три частотных диапазона эмиссии, исследование в которых отличаются как по задачам, так и по средствам наблюдений. Инфразвуковой диапазон частот (доли – единицы герц), называемый также сейсмическим, применяется для регистрации землетрясений и оценки их характеристик, мониторинга ядерных испытаний, в сейсморазведке. Ультразвуковой диапазон частот от 20–30 кГц до первых МГц используется в промышленности для раннего распознавания трещин, выявления скрытых дефектов в конструкциях различного типа, а также в геофизике при лабораторном деформировании образцов горных пород для изучения механизмов трещинообразования. Звуковой диапазон занимает промежуточное положение и играет важную роль во взаимодействии микро и макродислокаций, поэтому акустическая эмиссия на этих частотах представляет особый интерес при исследовании пластических процессов в природных средах. С ними связаны устойчивость ландшафтов, горных склонов, ледников, снежных покровов и крупных технических сооружений. Важную роль они играют и в формировании предвестников землетрясений различной природы. Однако особенности генерации и распространения сигналов звуковых частот в сложных естественных условиях до последнего времени сдерживали развитие акустических методов диагностирования.

Для регистрации сигналов акустической эмиссии в звуковом диапазоне частот (специалисты-геофизики часто используют термин сейсмоакустическая эмиссия) используются высокочастотные сейсмостанции с магнитоупругими [1] или пьезокерамическими [2] сейсмоакустическими приемниками (геофонами). Верхняя граница рабочего диапазона таких приборов обычно не превышает ста герц и только в некоторых образцах достигает 1 кГц. До последнего времени звуковой диапазон свыше 1 кГц считался малоэффективным по причине сильного затухания упругих колебаний на таких частотах в неоднородных по структуре породах [3]. Результаты исследований АЭ, проведенные в начале 21 века в сейсмоактивных регионах в нашей стране, на Сахалине [4] и Камчатке [5], а так же за рубежом в Италии [6], показали, что в звуковом диапазоне свыше 1 кГц регистрируются достаточно мощные геоакустические сигналы, в том числе связанные с подготовкой землетрясений. Этот диапазон целесообразно назвать высокочастотным относительно стандартного диапазона регистрации в сейсмоакустике. Поэтому далее при описании геосигналов, регистрируемых в диапазоне частот от сотен герц до первых десятков килогерц, будет использован термин высокочастотная акустическая эмиссия.

Метод регистрации акустической эмиссии в звуковом диапазоне частот

В исследованиях на Камчатке [5] было показано, что типичный сигнал акустической эмиссии складывается из последовательности релаксационных импульсов раз-

личной амплитуды и длительности, с ударным возбуждением и частотой заполнения от сотен герц до десятков килогерц [7]. Для исследования таких сигналов необходимо было разработать аппаратно-программный комплекс, позволяющий регистрировать и проводить анализ акустической эмиссии в широком диапазоне звуковых частот от единиц герц до первых десятков килогерц. При этом кроме непосредственно регистрации данных, необходимо было предусмотреть возможности по их хранению, анализу в разных частотных диапазонах, точной синхронизации времени, а также регистрации и учету метеорологических величин. В связи с перспективой размещения системы регистрации в удаленных труднодоступных районах, для уменьшения влияния техногенных помех, необходимо было реализовать удаленный контроль над оборудованием с организацией канала компьютерной радиосвязи через ретранслятор. На рис. 1 представлена структура аппаратно-программного комплекса по регистрации и анализу сигналов акустической эмиссии.

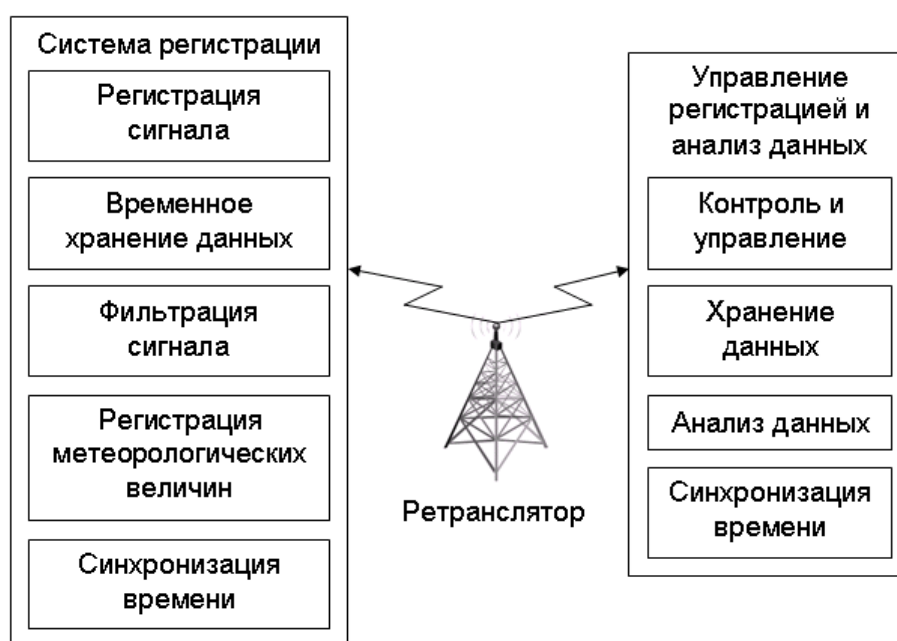


Рис. 1. Структура аппаратно-программного комплекса по регистрации и анализу сигналов акустической эмиссии в звуковом диапазоне частот

В связи с отсутствием геофонов, способных регистрировать геосигнал во всем диапазоне звуковых частот, с учетом результатов, полученных при регистрации сейсмоакустических сигналов гидроакустическими станциями, установленными на морском шельфе [4], в качестве датчиков акустической эмиссии были использованы пьезокерамические гидрофоны, установленные у дна природных и искусственных водоемов. Результаты экспериментальных исследований распространения сигналов в закрытых внутренних водоемах [5] и на морском шельфе [8] показывают, что на небольших расстояниях искажение формы импульсов при распространении в волноводе, состоящем из водного слоя и приповерхностного слоя грунта, не существенно. Таким образом, изучение геоакустических сигналов гидрофонами, установленными в воде у дна водоемов вполне допустимо. Следует отметить, что в жидкости отсутствуют поперечные колебания. Это можно использовать для селекции поляризации звуковых волн, распространяющихся в твердых средах.

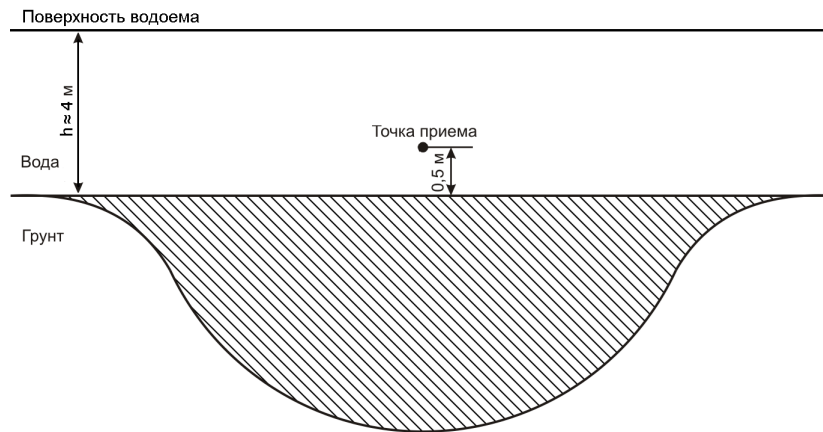


Рис. 2. Схема наблюдения акустической эмиссии. Приведено вертикальное сечение через точку установки приемника. Штриховкой отмечена область, из которой может осуществляться прием сигнала

На рис. 2 показана примерная схема акустического эксперимента. Генерация эмиссии происходит в приповерхностных осадочных породах, а регистрация сигнала осуществляется в жидкой среде у дна водоема. На границе раздела двух сред возникает рефракция. Коэффициент преломления при переходе продольных колебаний из осадочных пород в воду составляет, примерно, 1.2 – 1.7. С учетом небольших расстояний распространения сигналов эффектами рефракции можно пренебречь.

В экспериментах для регистрации сигналов акустической эмиссии в звуковом диапазоне частот была использована система из четырех пьезокерамических гидрофонов, направленных по сторонам света, с диаграммой направленности 60° , разработанная в ИКИР ДВО РАН.

Задача определения направления прихода волны была решена с применением векторно-фазовых методов [9], [10]. Использован комбинированный приемник (КП), производства ЗАО «Геоакустика» при ФГУП ВНИИФТРИ, измеряющий акустическое давление и три взаимно ортогональных компонента градиента давления. При обработке этих четырех сигналов находятся векторы колебательной скорости, смещения и плотности мощности акустического излучения. Для обнаружения, определения направления на источник излучения и анализа потока геоакустических импульсов разработан метод автоматизации [7]. В методе рассматривается форма огибающей сигнала, и определяется его вступление. По максимальным значениям огибающей находится амплитуда, далее выделяются импульсы и определяется их направленность. Из анализа исключаются сигналы с повышенными шумами, выявление которых осуществляется оценкой соотношения малой и большой полуосей описывающего эллипса.

При исследованиях направленности акустического излучения использовались понятия интегральной $\Omega(t)$ и дифференциальной $D(\alpha, t)$ акустической активности [7], [11]. Первая из этих величин представляет собой зависящую от времени частоту следования импульсов, а вторая – распределение частоты следования этих импульсов по направлениям $d\alpha$.

Разработан аппаратно-программный комплекс, который позволяет регистрировать и определять направление прихода оригинального сигнала в звуковом диапазоне частот, для хранения данных используется формат звуковых данных «Wave» [12]. Од-

новременно производится цифровая фильтрация в семи частотных поддиапазонах: менее 10, 30 – 60, 70 – 200, 200 – 600, 600 – 2000, 2000 – 6500, более 6500 Гц, с последующим детектированием и накоплением сигнала на интервале 4 секунды по каждому поддиапазону. Чтобы выявить причину возникновения аномалий в акустических сигналах анализируются их корреляции с измерениями деформаций и метеопараметров, а также с сейсмическими данными.

Системы регистрации акустической эмиссии были установлены в водоемах в трех пунктах комплексных геофизических наблюдений ИКИР ДВО РАН на Камчатке: базовой обсерватории «Паратунка» с 2008 г. и удаленных от нее на 20 км и 4 км, соответственно, станциях «Карымшина» с 1999 г. и «Мижижа» с 2001 г. [12].

Особенности проявления высокочастотного акустоэмиссионного эффекта

В ходе проведения исследования было установлено, что акустические сигналы деформационной природы можно разделить на импульсы в фоновый период и при увеличении скорости деформации пород. При этом активизация пластического процесса может быть связана с ослаблением пород в точке наблюдений или с возникновением удаленного источника напряжений [13]. В фоновый период наблюдаются незначительные по амплитуде акустические импульсы с частотой следования в пределах 0.1 – 0.5 импульсов в секунду.

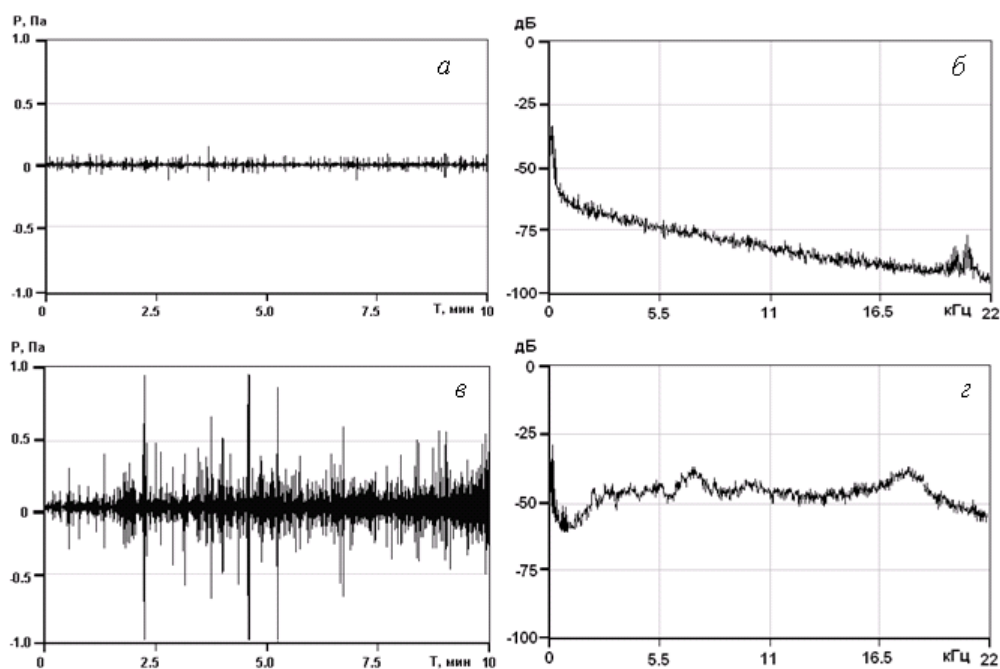


Рис. 3. Примеры акустических сигналов в фоновый период (а) и при увеличении скорости деформации (в), их энергетические спектры (б, з) соответственно

Для примера на рис. 3а показан 10 минутный фрагмент записи такого сигнала. На рис. 3б показан пример его энергетического спектра, полученного путем усреднения 16 реализаций быстрого преобразования Фурье (БПФ), рассчитанного по 2048

отсчета сигнала. Таким образом, при частоте дискретизации 44100 Гц для построения энергетического спектра использовалась реализация сигнала длительностью 0.74 секунды. Как видно из рис. 3б спектр сигнала сглажен и имеет плавный спад с ростом частоты, такие сигналы называются розовым или серым шумом. В спектре на рис. 3б есть локальный максимум в области 18 – 21 кГц, обусловленный резонансом приемника. На низких частотах присутствует подъем на частоте питающей сети 50 Гц.

Во время роста напряжений и скорости деформации пород наблюдается увеличение, как амплитуды импульсов, так и их количества в единицу времени. В качестве примера рассмотрим акустические сигналы, зарегистрированные 16 ноября 2007 года. На рис. 3в представлен 10 минутный фрагмент записи сигнала, а его энергетический спектр приведен на рис. 3г.

Сравнение спектра сигнала во время возмущений (рис. 3г) со спектром в спокойный период (рис. 3б) показывает, что наблюдается значительное повышение уровня сигнала в диапазоне 1 – 18 кГц. "Серый" или "розовый" шум фонового периода уступил место почти "белому" шуму деформационных возмущений. Сигналы (рис. 3а) наблюдались 16 ноября с 02:30 UT в течение 11.5 часов. Через 1.5 суток 17 ноября 2007 года в 17:16 UT на эпицентральной расстоянии 104 км произошло землетрясение с энергетическим классом $K = 12.8$. Координаты гипоцентра 52.8°N , 159.63°E , глубина 17 км (здесь и далее в тексте приведены оперативные данные по землетрясениям Камчатского филиала ГС РАН, для энергетической классификации землетрясений использовались классы K по шкале С.А.Федотова, связь K с магнитудой M_{LH} определяется формулой $M_{LH} = (K - 4.6) / 1.5$). Рассмотрено влияние метеоусловий и техногенных помех на формирование сигналов акустической эмиссии. Следует отметить, что учет дополнительных возмущений эмиссии под влиянием неблагоприятных погодных условий нетрудно осуществить по данным метеонаблюдений, а техногенные сигналы легко классифицируются [13].

Оценка направленности акустической эмиссии производилась в фоновые периоды в дни, когда отсутствовали ярко-выраженные продолжительные акустические аномалии и во время возмущений [11], [13].

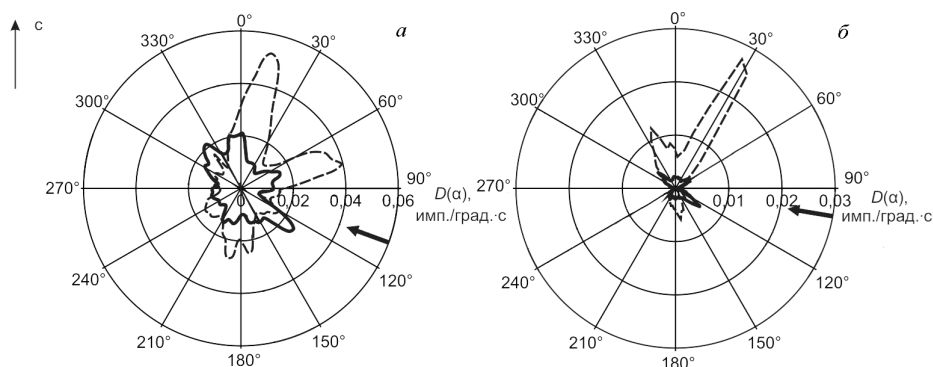


Рис. 4. Диаграмма азимутального распределения акустической активности $D(\alpha, t)$ (штриховая линия) 14.12.2007 г. (а) и 14.05.2008 г. (б). Сплошная линия - фоновая акустическая активность за ноябрь 2007 г. - февраль 2008 г. (а), май - июнь 2008 г. (б). Стрелками показаны направления из эпицентров землетрясений

На рис. 4 приведены примеры диаграмм азимутального распределения акустической активности в периоды интенсивных возмущений, обусловленных деформационными изменениями в осадочных породах в пункте наблюдения на фоне их усредненных значений в спокойные дни. Обычно при отсутствии возмущений распределение акустической активности по пространству достаточно изотропно. В обоих случаях, представленных на рис. 4, регистрируется несколько повышенная активность с юго-востока и северо-запада (сплошная линия), при этом структура дополнительных лепестков во многом повторяется. Отличия в активности эмиссии имеют сезонный характер. По множеству нерегулярно расположенных лепестков диаграмм направленности эмиссии на рис. 4 можно судить о сложном характере напряжений, а по асимметрии расположения максимумов излучения можно сделать вывод о неоднородности свойств среды вокруг точки наблюдений.

На фоне плавных сезонных вариаций акустической эмиссии возникают кратковременные (в течение суток) интенсивные возмущения. На рис. 4 акустическая активность $D(\alpha, t)$ в эти периоды показана штриховой линией. Пример анизотропии направленности акустической эмиссии, зарегистрированной 14.12.2007 г. за сутки перед землетрясением с энергетическим классом $K=11.6$, произошедшим 15.12.2007 г. в 9:00 UT на эпицентральной дистанции 175 км по азимуту 114° , координаты гипоцентра $52.34^\circ N$, $160.61^\circ E$, приведен на рис. 4а. Аномалия эмиссии длилась семь часов с 3 до 10 часов 14.12.2007 г. В данном случае наибольшая активность импульсов наблюдалась с направлений $10 - 20$ градусов. Кроме этого, несколько меньшее повышение активности регистрировалось и с диапазона направлений $60 - 80$ градусов. Сплошной линией для сравнения показана усредненная фоновая активность за период ноябрь 2007 г. – февраль 2008 г. На рис. 4б представлен пример анизотропии направленности акустической эмиссии, зарегистрированной 14.05.2008 г. за сутки перед землетрясением с $K=11.1$, произошедшим 15.05.2008 г. в 5:49 UT на эпицентральной дистанции 127 км по азимуту 104° , координаты гипоцентра $52.7^\circ N$, $160.06^\circ E$. Аномалия эмиссии продолжалась восемь часов с 0 до 8 часов 14.05.2008 г. Наибольшая активность импульсов наблюдалась в направлении 30° . Кроме этого несколько меньшее повышение активности регистрировалось и с диапазона направлений $330 - 340$ градусов. Сплошной линией для сравнения показана усредненная фоновая активность за период май – июнь 2008 г.

Несмотря на то, что оба землетрясения произошли по азимуту $100 - 115$ градусов относительно пункта наблюдения, перед событиями регистрировались аномальные повышения активности импульсов в направлениях, близких к $15 - 30$ градусам, хотя в целом графики конечно несколько различаются. Следует отметить, что при этом ни одна из активных областей не соответствует направлению на эпицентр землетрясения.

Для подтверждения деформационной природы выявленных высокочастотных аномалий акустической эмиссии проведены одновременные наблюдения эмиссии и деформации пород. Для измерения относительной деформации использован разработанный в ТОИ ДВО РАН лазерный деформограф–интерферометр неравноплечего типа, который был установлен на расстоянии 50 м от акустической системы на обсадных трубах двух пятиметровых сухих скважин, разнесенных на 18 м. На одной из скважин размещен укрытый боксом интерференционный узел с частотно-стабилизированным гелий-неоновым лазером, а на другой – защищенный контейнером уголкового отражатель. Нестабильность частоты лазера за сутки была не хуже 2×10^{-9} , длина волны излучения – 0.63 мкм, частота измерений – 860 Гц.

При четырнадцати разрядном АЦП чувствительность деформографа будет примерно 4×10^{-11} м, а точность измерения относительных деформаций при этом составляет около 2×10^{-12} . Разумеется, что при установке деформографа на поверхности земли, без специального укрытия такая точность измерений не может быть реализована. С учетом влияния вибраций и метеоусловий в точке наблюдений точность измерения относительных деформаций составляла примерно 10^{-8} . В сравнении с данными акустических наблюдений рассматривались относительные деформации пород ϵ и оценка скорости деформации $\dot{\epsilon}$, вычисленная как первые разности измерений ϵ , усредненных на интервале 1 секунда [14].

Результаты совместных исследований акустической эмиссии и деформаций показали, что высокочастотные аномалии эмиссии наблюдаются как при растяжении (рис. 5а), так и при сжатии приповерхностных пород (рис. 5б) с относительной деформацией за сутки 10^{-7} , а в ряде случаев и 10^{-6} (рис. 5), при значительном увеличении скорости деформации. При сопоставлении графиков эмиссии и деформаций видно, что акустические возмущения возникают во время многочисленных подвижек приповерхностных пород различной амплитуды. Деформации отдельных подвижек невелики, даже при сравнительно большой амплитуде они составляют не больше 10^{-8} (рис. 5). Данные, приведенные на рис. 5 получены в сейсмически спокойные периоды, когда на расстояниях до 250 км не регистрировались землетрясения с энергетическим классом $K > 10$.

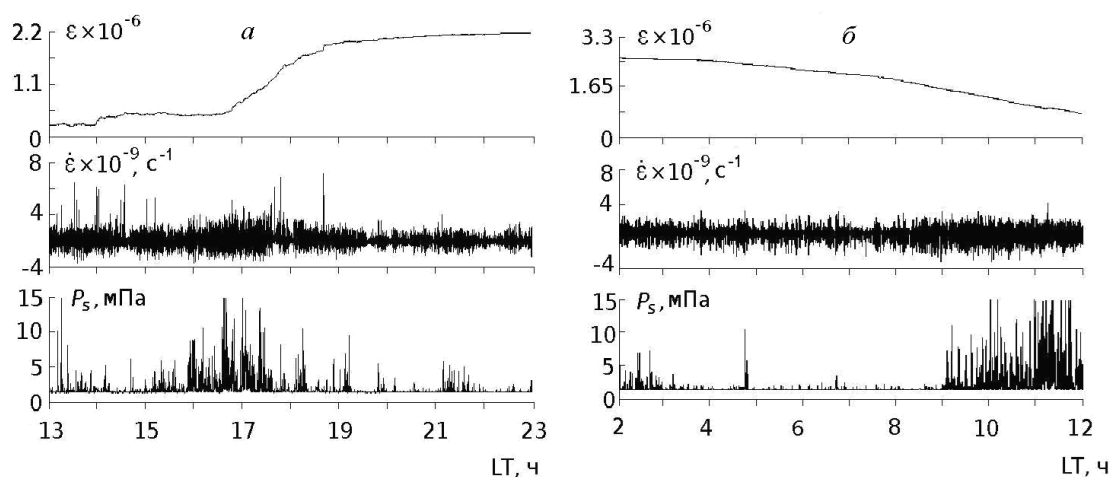


Рис. 5. Примеры аномалий акустической эмиссии и деформаций: при растяжении приповерхностных пород 14 октября 2009 г (а), при сжатии приповерхностных пород 18 октября 2009 г (б). ϵ – относительная деформация пород, $\dot{\epsilon}$ – скорость деформации, P_s – акустическое давление, накопленное за 4 секунды в диапазоне частот 0.6 – 2.0 кГц

Наиболее ярко влияние деформаций на поведение акустической эмиссии проявляется на заключительной стадии подготовки землетрясений [14]. На рис. 6 приведен пример одновременной аномалии акустической эмиссии и деформаций пород, зарегистрированной 1 мая 2007 г. за 25 часов до землетрясения с энергетическим классом 12.1, произошедшим 2 мая 2007 г. в 12:00 UT на эпицентральной расстоянии 154 км. Координаты гипоцентра 52.44°N , 160.33°E , глубина 12 км. Из рисунка видно, что в период с 1 до 9 часов наблюдаются достаточно резкие сжатия пород с последующими сбросами длительностью 1 - 5 минут, которые сопровождаются увеличением

скорости деформации и одновременным повышением уровня эмиссии в килогерцовом диапазоне частот. Амплитуда сжатий достигала 0.025 мкм, а скорость деформации увеличилась до 10^{-9} с^{-1} .

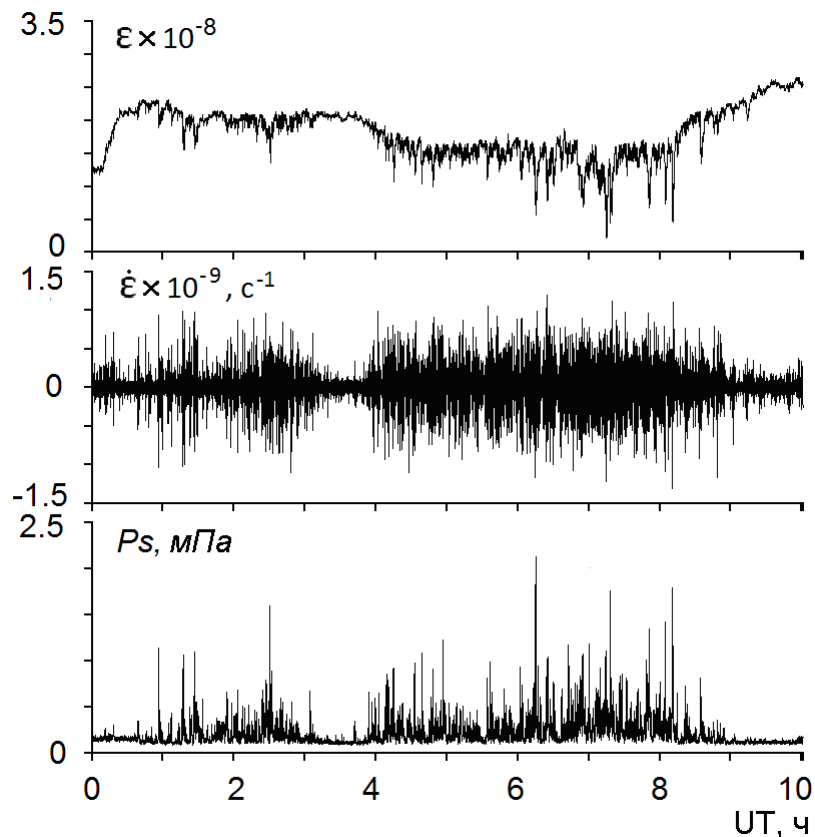


Рис. 6. Пример аномалии акустической эмиссии и деформаций пород перед землетрясением, произошедшим 2 мая 2007 г. в 12:00 UT. P_s – акустическое давление, накопленное за 4 секунды в диапазоне частот 2.0 – 6.5 кГц, остальные усл. обозн. см. в подрис. подписи к рис. 5

Для оценки связи между акустической эмиссией и деформациями пород были рассчитаны взаимнокорреляционные функции (ВКФ) между рядами акустического давления P_s в диапазоне 2.5 – 6.5 кГц и относительной деформацией ϵ , а так же скоростью деформации $\dot{\epsilon}$ в период от 0 до 12 часов 1 мая. Частота отчетов всех рядов была приведена к 0.25 Гц. В обоих случаях максимум ВКФ наблюдался на нулевом сдвиге и составлял -0.53 и 0.42 соответственно при уровне значимости менее 0.001 [14].

Заключение

Установлено существование акустоэмиссионного эффекта в осадочных породах, заключающегося в росте интенсивности геоакустического излучения в частотном диапазоне от сотен герц до первых десятков килогерц при увеличении скорости деформации породных массивов. Эффект устойчиво наблюдается на протяжении более чем десятилетнего натурального эксперимента на нескольких пространственно разнесенных станциях на Камчатке и наиболее сильно проявляется на заключительной стадии подготовки землетрясений.

Во время акустоэмиссионного эффекта возникает ярко выраженная анизотропия направленности геоакустического излучения, которая обусловлена ориентацией источников акустических колебаний в поле напряжений приповерхностных осадочных пород.

Библиографический список

1. Беляков А.С., Николаев А.В. Сейсмоакустические приёмники с магнитоупругим преобразователем // Физика земли. 1993. №7. С. 74-80.
2. Рыкунов Л.Н., Хаврошин О.Б., Цыплаков В.В. Аппаратура и методы исследования слабых сейсмических эффектов. Деп. В ВИНТИ, №2919-78. 1978.
3. Беляков А.С. Землетрясения и подземный звук // Земля и Вселенная. 1996. №2. С. 23-29.
4. Левин Б.В., Сасорова Е.В., Борисов С.А. и др. Оценка параметров слабых землетрясений и их сигналов // Вулканология и сейсмология. 2010. №3. С. 60-70.
5. Купцов А.В., Марापалец Ю.В., Шевцов Б.М. Анализ изменений геоакустической эмиссии в процессе подготовки сильных землетрясений на Камчатке // Эл. журнал «Исследовано в России». 2004. Т. 7. С. 2809-2818. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sci-journal.ru/articles/2004/262.pdf> (дата обращения: 31.03.2015).
6. Paparo G., Gregori G.P., Coppa U., De Ritis R., Taloni A. Acoustic Emission (AE) as a diagnostic tool in geophysics // Annals of Geophysics. 2002. Vol.45. N. 2. P. 401-416.
7. Марापалец Ю.В., Щербина А.О. Методы исследования пространственной анизотропии геоакустической эмиссии // Эл. журнал «Техническая акустика». 2008. 14. 17 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://ejta.org/archive/articles2008/marapuletz1.zip> (дата обращения: 31.03.2015).
8. Войтенко Е.А., Моргунов Ю.Н. Экспериментальные исследования распространения импульсных акустических сигналов в грунте // Акустический журнал. 2011. Т. 57. №1. С. 73-74.
9. Гордиенко В.А., Гордиенко Т.В., Купцов А.В., Ларионов И.А., Марापалец Ю.В., Рутенко А.Н., Шевцов Б.М. Геоакустическая локация областей подготовки землетрясений // Доклады АН. 2006. Т. 407. №5. С. 669-672.
10. Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Физматлит, 2007. 480 с.
11. Шевцов Б.М., Марापалец Ю.В., Щербина А.О. О направленности приповерхностной высокочастотной геоакустической эмиссии в периоды деформационных возмущений // Доклады АН. 2010. Т. 430. №1. С. 119-122.
12. Марापалец Ю.В., Шевцов Б.М., Ларионов И.А., Мищенко М.А., Щербина А.О., Солдчук А.А. Отклик геоакустической эмиссии на активизацию деформационных процессов при подготовке землетрясений // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31. №6. С. 59-67.
13. Марापалец Ю.В., Шевцов Б.М. Мезомасштабная акустическая эмиссия. Владивосток: Дальнаука, 2012. 126 с.
14. Larionov I.A., Marapulets Y.V., Shevtsov B.M. Features of the Earth surface deformations in the Kamchatka peninsula and their relation to geoacoustic emission // Solid Earth. 2014. N. 5. P. 1293-1300.

Поступила в редакцию / Original article submitted: 15.04.2015