

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРАВЛЕННОСТИ ГЕОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ НА ПУНКТЕ "МИКИЖА" (КАМЧАТКА) В ПЕРИОД 2004 - 2009 Г.Г.  
RESULTS OF INVESTIGATION OF GEOACOUSTIC EMISSION DIRECTION ON "MIKIZHA" STATION (KAMCHATKA) IN 2004 – 2009**

**А.О. Щербина, Ю.В. Марапулец**

Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН  
*Investigation of the direction of geoacoustic radiation was carried out at "Mikizha" site by a receiving system which allows us to define the direction of acoustic wave energy arrival and to analyze the character of particle motion of a medium by vector-phase methods. A combination vector receiver is used as an acoustic receiving device. A method for automatization of detection, high-precision determination of the direction to the radiation source and analysis of geoacoustic pulse flow is developed; it was realized in a hardware-software complex. During the evaluation of acoustic radiation direction the notions of integral and differential geoacoustic activity were used. The first value is pulse repetition rate depending on time. The second one is directional distribution of pulse repetition rate. Investigation of geoacoustic emission direction were carried out both in calm periods, when there were no deformation and meteorological disturbances, and in the periods of increase of the emission level in a daily interval before seismic events. In the result it was established that during the increase of emission intensity by more than one order clearly defined maximums appear in the direction of longitudinal oscillations. Using their direction we can evaluate the orientation of the axis of rock maximum compression near the observation site.*

Проводимые на Камчатском геофизическом полигоне исследования показывают, что в пределах суток перед некоторыми сильными сейсмическими событиями наблюдается заметный рост интенсивности геоакустической эмиссии и изменение ее направленных свойств. Этот акустический эффект наиболее ярко проявляется в килогерцовом диапазоне частот и определяется деформациями приповерхностных пород в пунктах наблюдений на удалении первых сотен километров от эпицентров готовящихся землетрясений [1, 2].

Поскольку прочность пород по отношению к касательным напряжениям меньше, чем к сжатию, то в месте наблюдения преобладают сдвиговые источники акустической эмиссии. В работах [3] показано, что ориентация источников такого типа обусловлена направлением максимальных касательных напряжений, ориентированных преимущественно под углом  $45^\circ$  к оси наибольшего сжатия. При этом максимумы продольных акустических колебаний приходятся на направления, перпендикулярные этой оси для волны сжатия и совпадающие с ней для волны разряжения. Как правило, волна сжатия по интенсивности больше волны разряжения, что связано с особенностями процессов разрушения пород и диссипации энергии. Диаграмма направленности поперечных колебаний повернута на  $45^\circ$  относительно диаграммы направленности продольных волн (рис. 1).

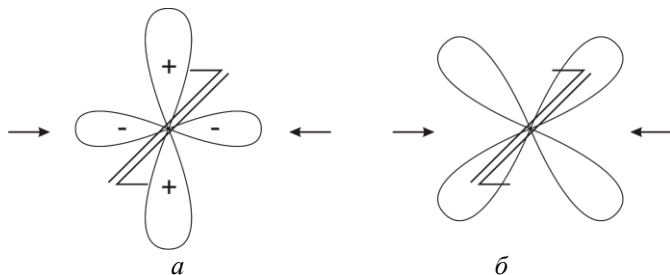


Рис. 1. Диаграммы направленности продольных (а) и поперечных (б) акустических колебаний сдвиговых источников. Стрелками отмечена ось наибольшего сжатия.

В экспериментах, проводимых на Камчатке с целью исследования данного эффекта, использовался комбинированный приемник производства ЗАО «Геоакустика» при ФГУП ВНИИФТРИ, представляющий собой сферическое тело диаметром 5 см с нейтральной плавучестью в водной среде. Прибор установлен на озере Микижа в полуметре от дна [4]. Горизонтальные размеры данного водоема 200x700 м, глубина не превышает 5 м. Вследствие многократных отражений сигнала от поверхности водоема и его дна,

существенно осложняющих процесс определения направления на его источник, для изучения геоакустической эмиссии использовались только два горизонтальных векторных канала, а обработка результатов проводилась для горизонтальной плоскости. Установка приемника в воде, где поперечные колебания сильно затухают, существенно облегчает задачу исследования направленности эмиссии, так как позволяет ограничиться исследованием только продольных волн.

В работе [1] показано, что источниками возмущений приповерхностной высокочастотной геоакустической эмиссии являются деформационные подвижки, относительные смещения которых  $10^{-7} - 10^{-6}$ . Скорость  $V_r$  смещения в подвижках создающих акустическую эмиссию примерно равна скорости поперечных колебаний  $V_s$  [3]. Подвижки с меньшими скоростями смещений излучают акустические колебания с меньшей эффективностью, поэтому их можно не рассматривать. В осадочных породах скорость продольных колебаний  $V_p \approx 1.8-2.5$  км/с [5], а отношение  $V_p / V_s \approx 1.73$  [6], что дает  $V_r \approx 1-1.5$  км/с. Размеры  $l = V_r/f$  источников геоакустической эмиссии, излучающих в диапазоне частот  $f = 1-18$  кГц, находятся в интервале  $l \approx 0.05-1.5$  м.

Согласно наблюдаемому времени затухания импульсов  $0.01 - 0.015$  с и скорости продольных колебаний в осадочных породах  $V_p \approx 1.8-2.5$  км/с расстояние ослабления сигнала находится как произведение этих величин и составляет от 18 до 37 м. Это расстояние соответствует размеру области, в пределах которой находятся источники акустических сигналов, регистрируемых приемником в килогерцовом диапазоне (рис. 2). При этом коэффициент ослабления сигнала (его амплитуды в  $e$  раз) равен обратной величине соответствующего расстояния  $0.03 - 0.06$  м<sup>-1</sup>, а при пересчете неперов в децибелы получается  $230 - 480$  дБ/км, что характерно для осадочных пород [7].



Рис. 2. Схема проведения эксперимента по изучению направленных свойств геоакустического сигнала. Приведено вертикальное сечение через точку установки приемника. Штриховкой отмечены области генерации, из которых может осуществляться прием геоакустического сигнала.

Если допустить, что сдвиговые источники распределены вокруг приемника достаточно равномерно, то их ориентация при отсутствии деформационных возмущений будет произвольной. Поэтому диаграмма распределения интенсивности геоакустического излучения по направлениям в точке приема будет соответствовать примеру, приведенному на рис. 3, а.

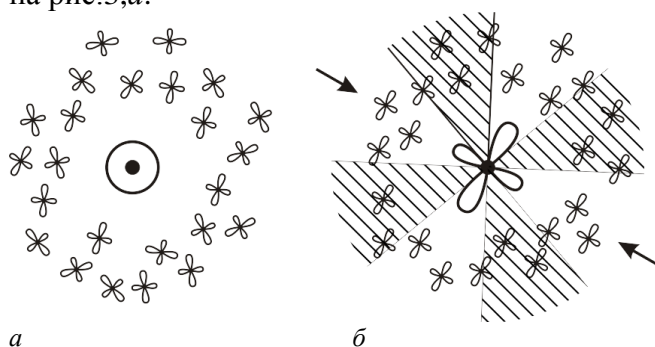


Рис. 3. Примеры диаграмм распределения интенсивности геоакустического излучения по направлениям в точке приема акустического сигнала сдвиговых источников при отсутствии деформационных возмущений (а), при их наличии (б). На рисунках толстой линией обозначены диаграммы распределения интенсивности геоакустического излучения по направлениям в точках приема, штриховкой — зоны расположения источников, не излучающих сигнал в направлении приемника. Стрелками отмечена ось наибольшего сжатия.

Увеличение напряжений, например, при подготовке землетрясений, приведет к появлению в зоне геоакустической эмиссии достаточно большого числа одинаково ориентированных сдвиговых источников (рис. 3, б). Вследствие того, что все они могут излучать сигнал только в нескольких узких взаимно ортогональных направлениях (рис. 1), в точке приема будут регистрироваться сигналы преимущественно с направлений, совпадающих или перпендикулярных оси сжатия. Вероятность регистрации других сигналов значительно

меньше. В случае если точка приема не будет находиться в центре зоны концентрации сдвиговых источников, либо если они будут распределены неравномерно, диаграмма распределения интенсивности геоакустического излучения по направлениям в точке приема регистрируемого геоакустического сигнала может приобрести значительную асимметрию.

Таким образом, анализ азимутального распределения регистрируемых геоакустических импульсов за единицу времени позволяет определить характеристики деформационных процессов, происходящих в районе места измерения. Амплитуда регистрируемых сигналов зависит от ориентации источника относительно приемника (рис. 1). Поэтому в период отсутствия возмущений, вследствие случайного распределения ориентаций источников, средняя амплитуда сигнала будет примерно одинакова по всем направлениям. В период деформационных возмущений, распределение средней амплитуды сигнала по азимутам будет неравномерным и зависеть от ориентации оси наибольшего сжатия.

Следует учесть, что геоакустические сигналы регистрируются на фоне шумов, формирующихся сразу несколькими источниками. Во-первых, это шумы приемного тракта, во-вторых, тепловые шумы водоема, и, в-третьих – сигналы геоакустической эмиссии. Последняя составляющая обусловлена тем, что частота следования сигналов эмиссии подчиняется закону повторяемости Гуттенберга-Рихтера. Поэтому всегда присутствуют геоакустические сигналы малой амплитуды с высокой частотой следования, которые не могут распознаваться отдельно и, соответственно, сливаются в единый шумоподобный сигнал. Если первая и вторая составляющие шума достаточно постоянны, то уровень шумов геоакустической природы существенно возрастает и вносит наибольший вклад в периоды деформационных возмущений, так как в это время возрастает поток импульсов, который в том числе формирует и шумовую составляющую. С учетом этого, направления регистрации сигналов эмиссии будут ограничиваться секторами, в которых геоакустические импульсы превышают шумовой порог. Как выше было указано, это направления близкие к оси сжатия или перпендикулярные ей. Соответственно, для оценки ориентации оси наибольшего сжатия достаточно разработать систему, способную выявлять импульсы на фоне шумов и оценивать их поток по направлениям. В получаемой диаграмме распределения интенсивности геоакустического излучения по направлениям в точке приема будут наблюдаться максимумы, по которым можно оценивать ориентацию оси.

Для автоматизации процесса обнаружения и определения направления на источник излучения геоакустических импульсов разработан программно-вычислительный комплекс [8]. При рассмотрении результатов использовались понятия геоакустической активности  $Q(t)$  и ее азимутального распределения  $D(\alpha, t)$ . Первая из этих величин представляет собой зависящую от времени частоту следования импульсов в определенном интервале амплитуд, а вторая – азимутальное распределение геоакустической активности.

Исследования направленности геоакустической эмиссии проводились, как в спокойные (фоновые) периоды, когда отсутствовали деформационные и метеорологические возмущения, так и в периоды перед землетрясениями. Непрерывные наблюдения, проведенные с августа 2007 г. по декабрь 2009 г., позволили определить, что в фоновые периоды диаграмма азимутального распределения геоакустической активности достаточно равномерна, а частота следования импульсов плавно изменяется в пределах от 0.1 до 1.2 в секунду (рис. 4). Причем данное изменение носит явный сезонный характер, так как, максимум всегда наблюдался осенью, а минимум – весной.

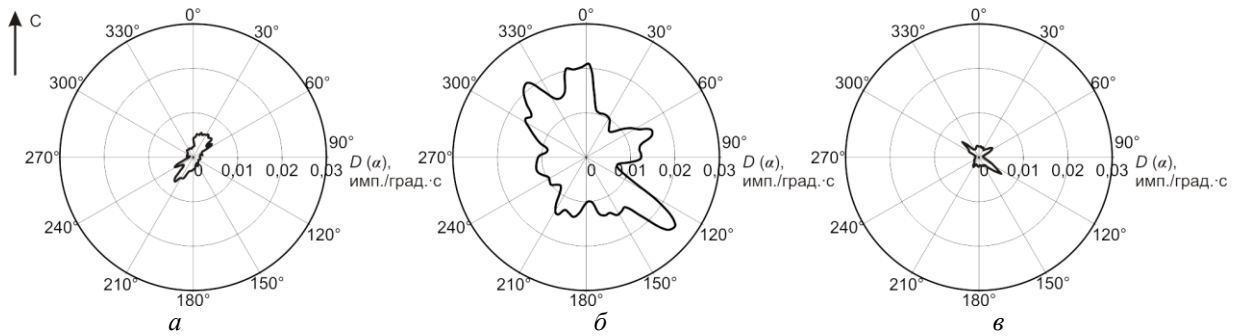


Рис. 4. Азимутальное распределение геоакустической активности  $D(\alpha)$  (имп./град.·с), соответствующее фоновому периоду весны 2004 г. (а), зимы 2007-2008 гг. (б) и весны-лета 2008 г. (в).

На фоне плавных сезонных изменений возникают кратковременные (в течение суток) интенсивные возмущения геоакустической эмиссии, связанные с деформационной активностью (рис. 5). В отличие от фона, периоды возмущений характеризуются заметным повышением уровня геоакустической эмиссии под действием деформационных возмущений, которые достаточно часто наблюдаются в преддверии некоторых сейсмических событий. Из приведенных графиков видно, что во всех случаях анизотропия направленности излучения относительно фона значительно усилилась. Причем по некоторым направлениям соотношение интенсивностей возмущения и фона может достигать нескольких десятков раз, тогда как по другим они практически равны.

Рассмотрим подробнее особенности формирования диаграммы распределения интенсивности геоакустического излучения по направлениям на примере случая, зарегистрированного 10.11.2004 (рис. 5,а) перед землетрясением, произошедшим в тот же день. На приведенной иллюстрации хорошо заметно наличие двух основных зон излучения, расположенных по направлениям  $25 \pm 10$  и  $225 \pm 25$  градусов. Учитывая, что интенсивность волн разряжения сдвигового источника достаточно мала, считаем, что регистрируемый с указанных направлений сигнал преимущественно состоит из волн сжатия. Таким образом, ось наибольшего сжатия в породах, ориентированная перпендикулярно основным направлениям прихода акустического сигнала, наклонена под углом около 120 градусов.

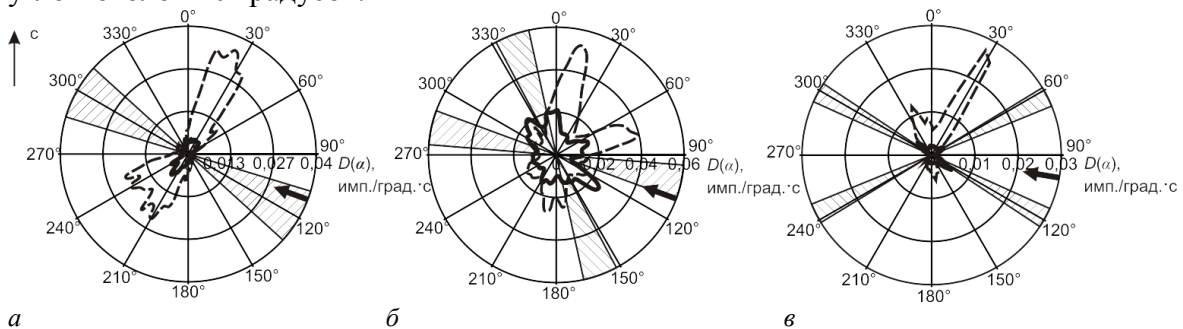


Рис. 5. Азимутальное распределение геоакустической активности в периоды возмущений (штриховая линия) 10.11.2004 (а), 14.12.2007 (б) и 14.05.2008 (в). Сплошной линией показан фоновый уровень эмиссии в соответствующие периоды, заштрихованные области – оценка ориентации оси наибольшего сжатия, стрелочками показаны азимуты землетрясений

Диаграммы распределения интенсивности геоакустического излучения по направлениям, приведенные на рис. 5,б-в, более сложные – в данные периоды наблюдаются по два хорошо отличимых направления, с которых регистрируется наибольший поток геоакустических импульсов. Наличие данных максимумов свидетельствует о том, что в эти периоды присутствовали два направления сжатия, ориентированные в первом случае под углами 115 и 160 градусов, во втором – 120 и 65 градусов. Во всех рассмотренных случаях концентрация источников геоакустического сигнала выше в северной части контролируемого пространства.

Таким образом, установленная на дне озера «Микижа» приемная система на базе комбинированного приемника может использоваться для оценки ориентации осей наибольшего сжатия в моменты деформационных возмущений.

### Литература

1. Долгих Г.И., Купцов А.В., Ларионов И.А., Марапулец Ю.В., Швец В.А., Шевцов Б.М., Широков О.Н., Чупин В.А., Яковенко С.В. Деформационные и акустические предвестники землетрясений. // ДАН, 2007, Т.413, №5. С.96-100.
2. Пережогин А.С., Шевцов Б.М., Сагитова Р.Н., Водинчар Г.М. Моделирование зон геоакустической эмиссии. // Математическое моделирование. 2007. Т. 19. № 11. С. 59-64.
3. Виноградов С.Д., Кузнецова К.И., Москвина А.Г., Штейнберг В.В. Физическая природа разрыва и излучение сейсмических волн. Физические процессы в очагах землетрясений. М.: Наука, 1980, с.129-140.
4. Гордиенко В.А., Гордиенко Т.В., Купцов А.В., Ларионов И.А., Марапулец Ю.В., Рутенко А. Н., Шевцов Б. М. Геоакустическая локация областей подготовки землетрясений. // ДАН, 2006, Т.407, №5. С.669-672.
5. Аносов Г. И., Биккенина С. К., Попов А. А. и др. Глубинное сейсмическое зондирование Камчатки. М.: Наука. 1978. 130 с.
6. Славина Л.Б. Исследование по физике землетрясений. М.: Наука. 1976. С. 217-236.
7. Клей К., Медвин Г. Акустическая океанография. М.: Мир. 1980. 580 с.
8. Марапулец Ю.В., Щербина А.О. // Техническая акустика. 2008. 14. <<http://www.ejta.org>>.