

## **Статистика появления пред- и постсейсмического отклика в направленности высокочастотной геоакустической эмиссии**

*А.А. Солодчук, А.О. Щербина*

*Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, с. Паратунка, 684034; e-mail: [aleksandra@ikir.ru](mailto:aleksandra@ikir.ru)*

В работе представлены результаты исследования пред- и постсейсмического отклика в направленности высокочастотной геоакустической эмиссии, регистрируемой на Камчатке. Приведена и исследована статистика его появления за период с 2008 г. по 2016 г.

### **Введение**

Результаты исследований геоакустической эмиссии (ГАЭ) в диапазоне частот от 0,1 Гц до 10 кГц, проводимых на Камчатке в ИКИР ДВО РАН, показывают, что сигналы эмиссии представляют собой комбинации релаксационных импульсов различной амплитуды и длительности, с ударным возбуждением и частотой заполнения от сотен герц до десятков килогерц [4]. На различных стадиях сейсмического процесса частота следования импульсов (акустическая активность  $\Omega(t)$ ) и ее распределение по направлениям варьируются. Так, в спокойные периоды акустическая активность не превышает 0,1–0,5 имп./с и имеет достаточно равномерное распределение по направлениям [5]. При активизации пластического процесса, в том числе перед землетрясениями и некоторое время после них, ее значение может достигать десятков и даже сотен импульсов в секунду, а на диаграмме ее азимутального распределения появляются ярко выраженные максимумы по отдельным направлениям. Особенно ярко такие эффекты регистрируются в килогерцовом диапазоне частот [8].

### **Методы исследования**

Для исследования пространственной структуры сигналов высокочастотного геоакустического излучения (0,7–10 кГц) на Камчатке в пункте наблюдений «Микижа» (52,60° N, 158,14° E) ИКИР ДВО РАН развернут аппаратно-программный измерительный комплекс. Регистрация сигналов производится с помощью инерционного комбинированного приемника (КП), разработанного в ЗАО «Геоакустика» при ФГУП ВНИИФТРИ. КП объединяет в себе сферический преобразователь акустического давления и трехкомпонентный приемник градиента давления, датчики которого расположены вдоль взаимно ортогональных направлений. Конструктивные особенности КП позволяют определять направления на источники геоакустического излучения векторно-фазовыми методами [1].

Анализ изменения направленности геоакустической эмиссии во время землетрясений проводился следующим образом. Из оперативного каталога землетрясений Камчатского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» были отобраны 339 сейсмических событий, произошедших в период с августа 2008 г. по январь 2016г. Критерии для отбора землетрясений (таблица 1) приняты в соответствии с [2, 7] и скорректированы по результатам натурных исследований [5]. Землетрясения, произошедшие с 10 февраля по 09 июля 2013г., не рассматривались при анализе из-за отсутствия геоакустических данных в указанный период.

Затем в условиях спокойной погоды (слабоменяющееся давление, отсутствие осадков и ветра более 6 м/с) в интервале  $\pm 5$  суток в окрестности землетрясения рассматривались величина акустической активности и ее азимутальное распределение. Считалось, что в направленности ГАЭ наблюдаются аномалии, связанные с землетрясением, когда в вышеуказанном временном интервале частота следования

геоакустических импульсов и ее распределение по какому-либо одному или нескольким отдельным направлениям превышают значения соответствующих фоновых уровней в 2,5 и более раз. Фоновые уровни принимались по результатам предварительного анализа ряда многолетних наблюдений акустической активности.

**Таблица 1. Критерии для отбора землетрясений.**

Энергетический класс $K_S$	Эпицентральное расстояние R, км
$9,0 < K_S \leq 10,0$	$R \leq 120$
$10,0 < K_S \leq 11,0$	$R \leq 190$
$11,0 < K_S \leq 12,0$	$R \leq 240$
$K_S > 12,0$	$R \leq 350$

### Результаты исследования и их обсуждение

В результате совместного анализа азимутального распределения ГАЭ и землетрясений установлено наличие аномалий направленности геоакустического излучения в окрестностях 251 землетрясения из 339, что составляет 74% (таблица 2).

**Таблица 2. Землетрясения Камчатки с откликом ГАЭ и без него.**

Энергетический класс $K_S$	Эпицентральное расстояние R, км	Всего	Имели отклик	Процентное соотношение, %
$9,0 < K_S \leq 10,0$	$R \leq 120$	89	44	49
$10,0 < K_S \leq 11,0$	$R \leq 190$	112	92	82
$11,0 < K_S \leq 12,0$	$R \leq 240$	74	64	86
$K_S > 12,0$	$R \leq 350$	64	51	79
	ИТОГО:	339	251	74

Некоторые из выбранных землетрясений следовали друг за другом настолько часто, что связанные с ними аномалии накладывались одна на другую, существенно затрудняя оценку пред- и постсейсмических эффектов в направленности ГАЭ. По этой причине такие события исключались из дальнейшего рассмотрения. Таким образом, для анализа было выделено 82 не пересекающихся по времени случая регистрации геоакустического отклика из 251.

В ходе проведенного обобщения установлено, что длительность выделенных аномалий варьируется в диапазоне от 10 до 50 ч, а повышенная активность регистрируется в основном с азимутов  $50^\circ$ ,  $155^\circ$ ,  $225^\circ$ ,  $320^\circ$ . Полученные значения азимутов согласуются с результатами ранее проведенных исследований [6].

Анализ временных характеристик периодов аномалий направленности геоакустического излучения в окрестности землетрясений показал, что в основном аномалии начинают проявляться за 10-30 ч перед землетрясением и в большинстве случаев продолжаются в течение 6-20 ч после него.

Связи между длительностью аномалий и классом землетрясений, а также эпицентральным расстоянием выявлено не было. Коэффициенты корреляции этих величин составили, соответственно, минус 0,04 и 0,01 при уровнях значимости 0,7 и 0,9.

В качестве примера на рисунке 1 представлены аномалии направленности геоакустического излучения, связанные с Жупановским землетрясением с энергетическим классом  $K_S=15,7$ , произошедшим 30 января 2016 г. в 03:25 UT ( $53,85^\circ$  N,  $159,03^\circ$  E) по азимуту  $\varphi=29^\circ$  на эпицентральном расстоянии  $R=110$  км (1 на графике), и его наиболее сильными афтершоками, зарегистрированными 30 января 2016 г. в 03:42 UT ( $53,75^\circ$  N,  $159,07^\circ$  E) с  $K_S=11,6$ ,  $R=101$  км,  $\varphi=33^\circ$  (2 на графике) и в 06:53 UT ( $53,87^\circ$  N,  $159,21^\circ$  E) с  $K_S=10,5$ ,  $R=117$  км,  $\varphi=33^\circ$  (3 на графике). Аномалия по диапазону направлений от  $330^\circ$  до  $350^\circ$  (рисунок 1б), при которой наблюдалось

превышение фонового уровня акустической активности более чем в 5 раз (рисунок 1а), началась за 15 ч до землетрясения с  $K_S=15,7$  и закончилась примерно за 30 минут до него. Практически одновременно с ней по азимуту  $280^\circ$  (рисунок 1б) зарегистрировано несколько меньшее повышение активности, которое продолжалось и после землетрясения и вероятнее всего связано с наличием афтершоков.

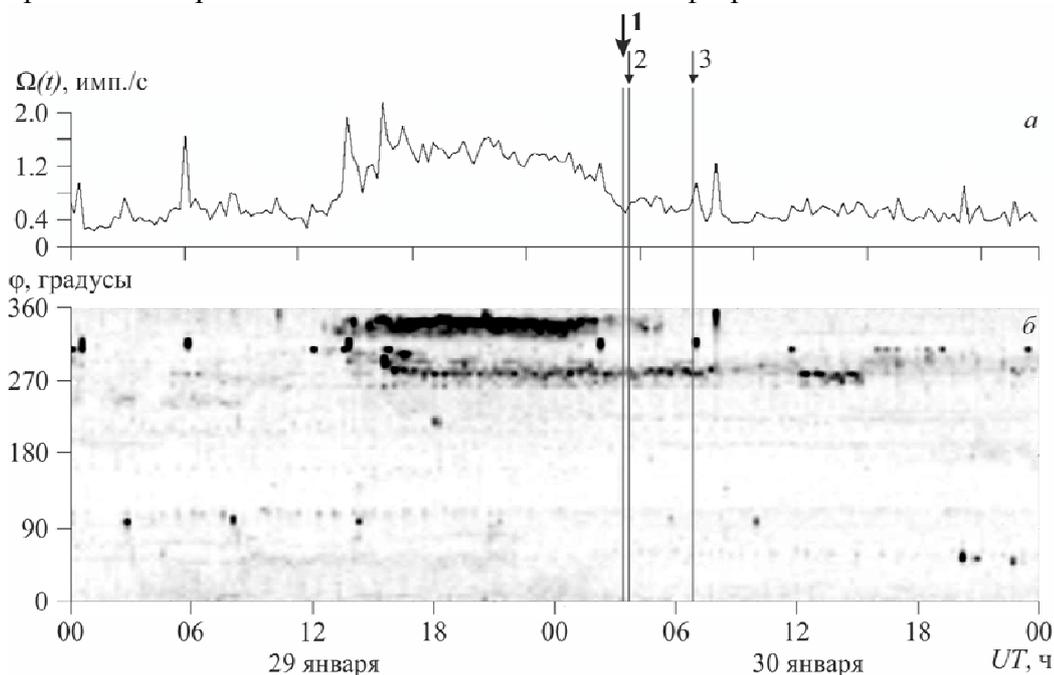


Рис. 1. Акустическая активность  $\Omega(t)$  (а) и ее азимутальное распределение (б) в окрестности Жупановского землетрясения (1) и его афтершоков (2 и 3).  $\phi$  – азимут. Стрелками с продолжением в линии показано время землетрясений.

Интересный случай изменений в направленности ГЭЭ представлен на рисунке 2. На нем демонстрируется пример регистрации повышенной акустической активности (рисунок 2а) с разных направлений в окрестностях трех землетрясений: 1 декабря 2016 г. в 05:16 UT ( $52,16^\circ$  N,  $158,36^\circ$  E) с энергетическим классом  $K_S=11,3$  и эпицентральной дистанцией  $R=93$  км по азимуту  $\phi=175^\circ$  (1 на графике), 2 декабря 2016 г. в 01:16 UT ( $51,39^\circ$  N,  $157,95^\circ$  E) с  $K_S=11,9$ ,  $R=179$  км,  $\phi=186^\circ$  (2 на графике) и в 12:26 UT ( $50,76^\circ$  N,  $158,01^\circ$  E) с  $K_S=11,5$ ,  $R=248$  км,  $\phi=184^\circ$  (3 на графике). Так, по рисунку 2б видно, что примерно за 13 ч до землетрясения с  $K_S=11,9$  началась аномалия в диапазоне направлений от  $270^\circ$  до  $290^\circ$ , которая наблюдалась в течение 16 ч. Сразу после нее, предвеляя землетрясение с  $K_S=11,5$ , возникла повышенная активность в диапазоне азимутов от  $310^\circ$  до  $330^\circ$ , которая сохранялась еще около 4 ч после землетрясения. Аномалия по азимуту  $75^\circ$  наблюдалась в течение 54 ч в окрестности всех трех землетрясений.

### Заключение

В направленности высокочастотной геоакустической эмиссии наблюдаются аномальные изменения, связанные с землетрясениями, которые выражаются в виде значительного увеличения частоты следования геоакустических импульсов по отдельным направлениям. Они наблюдаются как при подготовке землетрясений, так и при релаксации остаточных напряжений в пункте наблюдений. За период с 2008 г. по 2016 г. более 70% землетрясений имели отклик в направленности эмиссии.

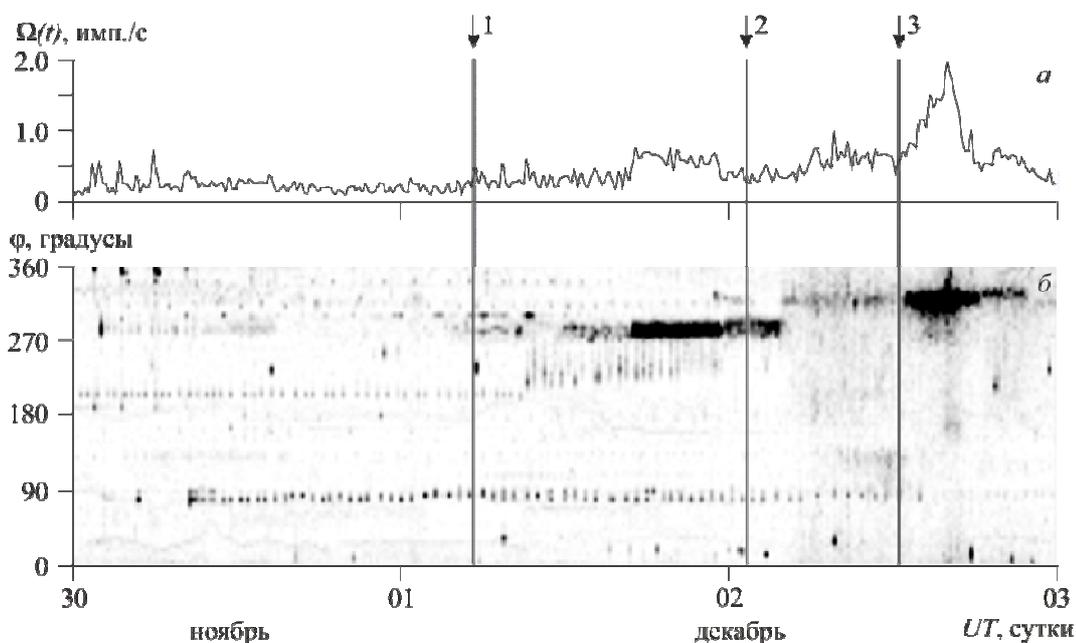


Рис. 2. Акустическая активность  $\Omega(t)$  (а) и ее азимутальное распределение (б), зарегистрированные в окрестности землетрясений с энергетическими классами  $K_S=11,3$  (1),  $K_S=11,9$  (2) и  $K_S=11,5$  (3).  $\phi$  – азимут. Стрелками с продолжением в линии показано время землетрясений.

### Список литературы

1. Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Физматлит, 2007. 480 с.
2. Добровольский И.Р. Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. М.: Физматлит, 2009. 236 с.
3. Купцов А.В. Изменение характера геоакустической эмиссии в связи с землетрясением на Камчатке // Физика Земли. 2005. № 10. С. 59-65.
4. Маранулец Ю. В., Ларионов И. А., Мищенко М. А и др. Отклик высокочастотной геоакустической эмиссии на активизацию пластических процессов в сейсмоактивном регионе // Ученые Записки Физического Факультета МГУ. 2014. № 6. 6 с.
5. Маранулец Ю.В., Шевцов Б.М., Ларионов И.А. Отклик геоакустической эмиссии на активизацию деформационных процессов при подготовке землетрясений // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31. № 6. С. 59-67.
6. Маранулец Ю.В., Щербина А.О. Особенности азимутального распределения потока геоакустических сигналов в условиях изменчивости деформационного процесса в приповерхностных работах // Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений. Сборник докладов VI Международной конференции. Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2013. С. 349-353.
7. Пережогин А.С., Шевцов Б.М. Модели напряженно-деформированного состояния горных пород при подготовке землетрясений и их связь с геоакустическими наблюдениями // Вычислительные технологии. 2009. Т. 14. № 3. С. 48-57.
8. Marapulets Yu., Solodchuk A., Shcherbina A. Changes of geoacoustic emission directivity at «Mikizha» site associated with earthquakes in Kamchatka // VII International Conference “Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquakes Precursors”, E3S Web of Conferences. 2016. Vol. 11. 5 p.