

УДК 551.466.62

## ГИДРОАКУСТИЧЕСКАЯ ЛОКАЦИЯ ОБЛАСТИ ЗАРОЖДЕНИЯ ОКЕАНИЧЕСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

© 2003 г. Член-корреспондент РАН С. С. Лаппо, Б. В. Левин, Е. В. Сасорова,  
В. Е. Морозов, И. Н. Диденкулов, Я. С. Карлик

Поступило 27.08.2002 г.

Выполненный сравнительный анализ длительных записей высокочастотных (необработанных) гидроакустических сигналов на шельфе Камчатки и сейсмических событий в прибрежной зоне в период 1998–1999 гг. позволил впервые обнаружить несколько серий сигналов от океанических микроземлетрясений, произошедших в области подготовки крупного землетрясения. Продемонстрирована возможность локации направления на источник возникновения микроземлетрясений и область подготовки землетрясения при использовании многоканальной гидроакустической антенны.

Накопленный опыт гидроакустических исследований [1] показывает, что среди обширной информации о шумах в океане, вызываемых движущимися и неподвижными объектами, на записях стационарных гидроакустических антенн выделяется информация, связанная с подготовкой и развитием океанических землетрясений. Открывшийся недавно доступ к записям сигналов антенной типа “Агам” (разработка ЦНИИ “Морфизприбор”), расположенной на восточном побережье Камчатки в Тихом океане и задействованной в 1998–1999 гг. в рамках международной программы “АТОК”, позволил впервые выделить и проинтерпретировать сигналы, исходящие из области зарождения океанического землетрясения. Антенна погружена в воду, расположена вблизи от дна, имеет размер  $100 \times 17$  м и содержит более 2000 гидрофонов.

Задачей исследования было сопоставление сейсмических и гидроакустических сигналов (ГАС) и выявление местоположения области расположения излучателей с использованием современных представлений о структуре сейсмоакустического режима среды при подготовке землетрясе-

ния [2–5]. Материал по программе АТОК включал 162 непрерывных записи в период с 12.07.1998 г. по 21.03.1999 г. при длительности одной записи 1323.73 с и выполнении до 6 записей в сутки. Цифровой сигнал записывался с частотой дискретизации 300 отсчетов в секунду (прием частот до 110 Гц). Весь период наблюдения составлял 276 суток, а совокупная длина записей – 3564 мин или 2.475 суток. За этот период в районе Камчатки ( $48^\circ$ – $60^\circ$  с.ш.,  $151^\circ$ – $173^\circ$  в.д.) согласно каталогу землетрясений произошло 3058 сейсмических событий.

Удалось обнаружить один случай полного совпадения во времени сейсмического события с началом в источнике в 03:15:46 и записи ГАС (запись за 20.10.1998 г., 1-й сеанс с 02:54:20 по 03:16:24). Начало землетрясения приходится на самый конец сеанса. Согласно региональному каталогу его энергетический класс  $K = 10.3$ , глубина гипоцентра 119 км; горизонтальное расстояние от эпицентра до приемника 50.4 км, от гипоцентра 129.23 км. Обнаружена также серия событий, когда землетрясения происходили через несколько десятков минут после окончания записи. Для всех этих случаев на записях ГАС обнаружены серии отчетливо выделяемых сигналов, опережающих сигнал от сейсмического события и излученных из источника, близкого к эпицентру.

Были выделены два типа сигналов, предшествующих основному толчку. К первому типу относятся микроземлетрясения (МЗТ) из околоочаговой зоны с акустическими сигналами в диапазоне 40–75 Гц, длительностью от 3 до 4 с и очень резкими амплитудными скачками в первые 1–2 с (20-кратное увеличение амплитуды ГАС над фоновым уровнем). В табл. 1 приведены данные по девяти МЗТ, выделенным на 1-м сеансе записи за 20.10.1998 г. Высокоамплитудная часть сигнала имеет частоту 60–75 Гц, а затем уменьшается амплитуда и частота (до 40–50 Гц).

Вторым типом выделенных акустических сигналов является высокочастотный шум с частотой 30–40 Гц и 4-кратным превышением по амплитуде над фоновым уровнем. Шум появляется непосредственно перед землетрясением (см. табл. 1),

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова  
Российской Академии наук, Москва*

*Институт прикладной физики  
Российской Академии наук,  
Нижний Новгород*

*Центральный научно-исследовательский институт  
“Морфизприбор”, Санкт-Петербург*

**Таблица 1.** Временная последовательность и параметры микроземлетрясений (МЗТ) и сейсмического шума, предшествовавших землетрясению, на проанализированной записи гидроакустических сигналов 20.10.1998 г.

Последовательность событий	Время вступления, ч:мин:с по Гринвичу	Время до предыдущего события, мин:с	Интервал времени между <i>P</i> - и <i>S</i> -волнами, с	Оценка глубины очага МЗТ под дном, м	Частота сигнала в максимальной фазе, Гц	Оценка размера источника сигнала, м
Начало записи	02:54:20	–	–	–	–	–
МЗТ № 1	03:03:39.51	09:19.51	0.083	191(207)	65	23
МЗТ № 2	03:05:47.57	02:08.06	0.093	214(232)	59	28
МЗТ № 3	03:07:35.86	01:48.09	0.103	237(258)	61	26
МЗТ № 4	03:09:00.42	01:24.56	0.143	329(358)	58	29
МЗТ № 5	03:10:03.22	01:02.08	0.07	161(175)	73	18
МЗТ № 6	03:11:55.98	01:52.76	0.08	184(200)	75	17
МЗТ № 7	03:13:11.45	01:15.47	0.08	184(200)	55	33
МЗТ № 8	03:14:24.16	01:12.72	0.057	131(143)	62	22
МЗТ № 9	03:15:45.78	01:21.62	0.087	200(218)	71.5	19
Начало шума	03:16:05.20	00:19.14	–	–	43	53
Конец сеанса записи	03:16:23.73	00:18.51	–	–	–	–

**Таблица 2.** Временная последовательность сеансов гидроакустических записей и землетрясений (ЗТ) в течение 05.02.1999 г.

№ п. п.	Тип события	Время, ч:мин:с	Координаты эпицентра		Глубина, км	Энергетический класс	Расстояние, км
			с.ш.	в.д.			
1	Сеанс записи	02:54:20–03:16:24					
2	ЗТ	03:29:1.2	53.55°	160.55°	11	7.2	168.08
3	Сеанс записи	06:54:20–07:16:24					
4	Сеанс записи	10:54:20–11:16:24					
5	ЗТ	12:02:55.5	55.41	162.18	35	7	381.41
6	ЗТ	12:11:23.5	53.6	161.12	11	8.6	181.20
7	Сеанс записи	14:54:20–15:16:24					
8	ЗТ	16:37:36.8	53.25	158.62	149	7.7	122.15
9	ЗТ	16:48:47.3	49.22	158.71	9	8	325.29
10	Сеанс записи	18:54:20–19:16:24					
11	ЗТ	19:39:54.7	52.85	159.56	55	7.2	84.08
12	ЗТ	20:16:13.1	53.53	165.5	10	8.8	293.78
13	Сеанс записи	22:54:20–23:16:24					
14	ЗТ	23:46:6.1	53.61	161.27	10	8.1	184.60

затем сливается с сейсмическим сигналом от главного толчка.

В табл. 1 приведена оценка размера области разрушения для каждого МЗТ по частоте сигнала [3, 5], излучаемого в фазе максимальной амплитуды. На рис. 1а представлена спектрограмма записи ГАС за 20.10.1998 г. и исходная цифровая запись (рис. 1б). На спектрограмме интенсивность черного цвета в каждой точке показывает энергетический вклад соответствующей частоты в

данный момент времени. Выделяются несколько участков, где возникают микроземлетрясения, предшествовавшие основному толчку. На рис. 1а выделено 9 таких участков. На рис. 1в представлен фрагмент записи с микроземлетрясением. В конце записи (на рис. 1б) отмечен высокочастотный шум, который выделен как отдельный фрагмент (рис. 1г).

В воде распространяются только волны сжатия–растяжения. На границе земля–вода попе-

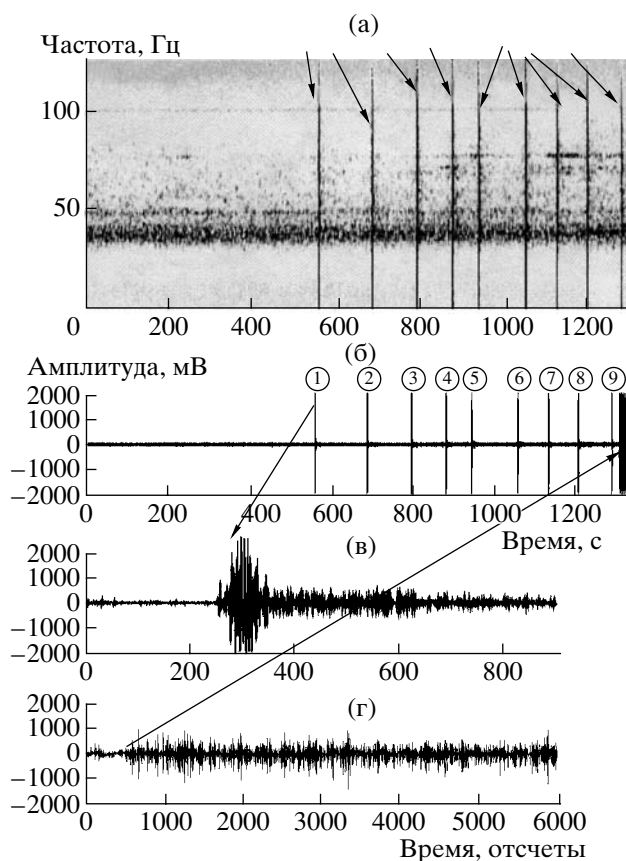
речные волны твердой среды преобразуются в продольные волны в воде. По разности времен прихода этих волн можно судить о расстоянии от источника микроземлетрясения до границы раздела среды (области на дне, излучившей данную волну в воду). Как видно из табл. 1, разница во времени прихода *P*-волн и преобразованных *S*-волн около 0.1 с, следовательно, можно заключить, что данные разрушения происходили не вблизи гипоцентра, а в приповерхностной зоне (оценка расстояния от источника до границы раздела для каждого МЗТ от события за 20.10.1998 г. приведена в табл. 1).

Все микроземлетрясения уверенно регистрировались на всех 14 каналах антенны, причем характер сигнала на различных каналах практически идентичный и различается только временем прихода на канал, что позволяет определять направление на источник сигнала [6]. Микроземлетрясения, выделенные на записи 20.10.1998 г., и эпицентр землетрясения локализованы в северном направлении вдоль горизонтальной оси антенны (угол  $\approx 37^\circ$  с биссектрисой вдоль антенны).

В тех случаях, когда землетрясения начинались через несколько десятков минут после окончания записи, удавалось зафиксировать только микроземлетрясения, предшествующие основному толчку. Например, за 5.02.1999 г. имеются записи всех шести сеансов. В этот день произошло 8 землетрясений (см. табл. 2), но только после сеанса 06:54:20–07:16:24 не наблюдалось ни одного землетрясения. На рис. 2 представлены спектрограммы для всех сеансов за этот день. После всех сеансов, кроме 6-часового, на спектрограммах наблюдаются микроземлетрясения, и они отсутствуют только на записи для 6-часового сеанса, когда в течение всех 4 ч после окончания записи не было ни одного землетрясения. Анализ остальных записей, предшествовавших землетрясениям, дает аналогичную картину.

По мере удаления эпицентра землетрясения от места регистрации характер ГАС от микроземлетрясений изменяется. На поверхности раздела земля–вода акустический сигнал излучается на значительной площади, а затем суммируется при регистрации. Однако, если расстояние от эпицентра до места регистрации составляет не более 300 км, выделение МЗТ из акустических записей возможно без применения специальных методов обработки.

На основе совместного анализа цифровых гидроакустических записей и регионального Камчатского каталога землетрясений были выявлены записи ГАС, совпадающие с сейсмическими событиями или им предшествующие. При этом обнаружено два типа сигналов, предшествующих землетрясениям:

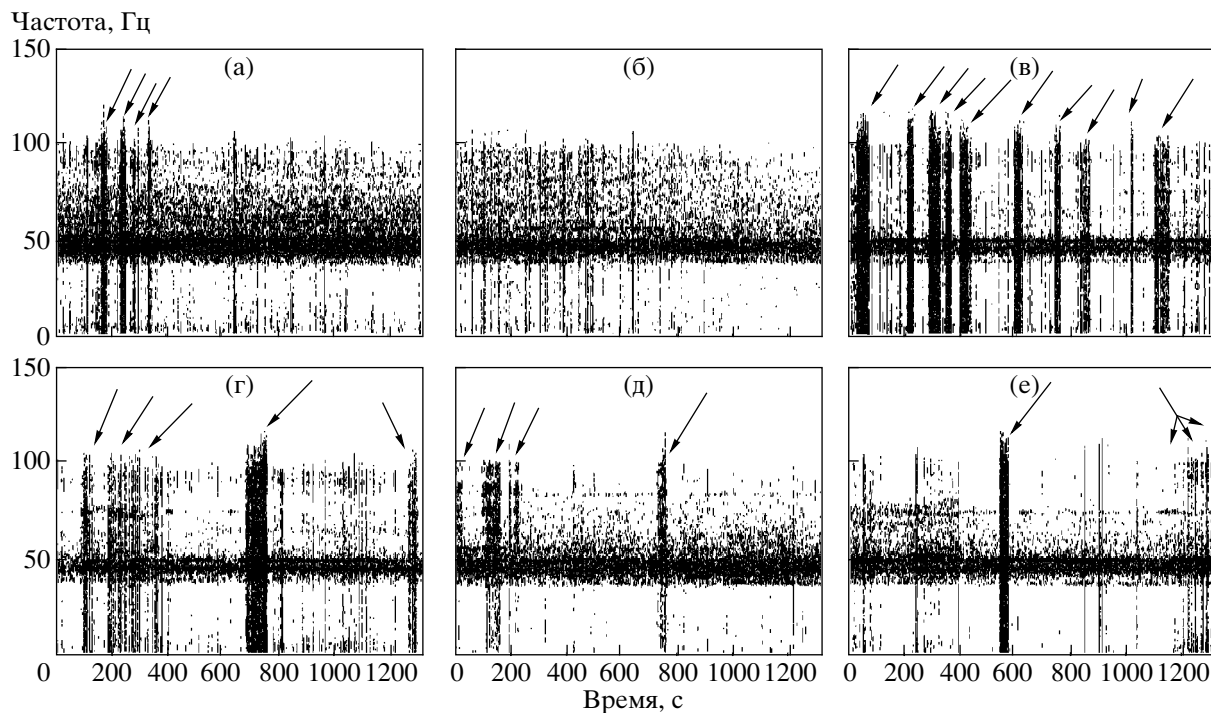


**Рис. 1.** Цифровая запись гидроакустических сигналов 20.10.1998 г. (сеанс 02:54:20–03:16:24), совпадающая по времени с началом землетрясения. Приведена спектрограмма записи с отмеченными стрелками сигналами микроземлетрясений (а) и полная цифровая запись сигнала за весь сеанс с указанием номеров микроземлетрясений (МЗТ) цифрами в кружочках (б); по оси абсцисс – время в секундах, по оси ординат – частота сигнала (Гц) и амплитуда (мВ). Масштабированный фрагмент записи первого МЗТ (v) и вступления сейсмического шума, предшествующего землетрясению (г); по оси абсцисс – время в отсчетах (1 отсчет = 3.33 мс). На записи МЗТ (v) легко выделяются моменты, связанные с вступлениями волн *P* и *S*.

1) серия микроземлетрясений из околоочаговой зоны с сигналами в диапазоне частот 40–75 Гц и длительностью от 3 до 4 с, которые могут возникать более чем за час перед основным толчком из близких, но различных источников;

2) высокочастотный шум с частотой 20–40 Гц, появляющийся непосредственно перед землетрясением (за несколько секунд) и затем сливающийся с сейсмическим сигналом от главного толчка.

Исследования гидроакустических записей позволяют выделять сигналы, генерируемые в критической стадии из околоочаговой зоны, которые наземные сейсмографы не в состоянии улавливать из-за быстрого затухания этих сигналов в твердой породе. Анализ ГАС также дает возмож-



**Рис. 2.** Спектрограммы записей гидроакустических сигналов 05.02.1999 г. для всех шести сеансов записей: 1) 02:54:20–03:16:24 (а), 2) 06:54:20–07:16:24 (б), 3) 10:54:20–11:16:24 (в), 4) 14:54:20–15:16:24 (г), 5) 18:54:20–19:16:24 (д), 6) 22:54:20–23:16:24 (е). Время указано по Гринвичу. События МЗТ отмечены стрелками везде, кроме сеанса № 2 (б), где МЗТ не наблюдались. После этого сеанса землетрясения не отмечались.

ность представить процессы, происходящие в зоне эпицентра на стадии, предшествующей основному толчку, и установить направление на сейсмический источник генерации акустического сигнала в океане.

Авторы благодарят за частичную финансовую поддержку РФФИ (грант 01–05–64162) и Программу поддержки ведущих научных школ (грант 00–15–98583).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Из истории отечественной гидроакустики / Под ред. Я.С. Карлика. СПб.: Изд-во ГНЦ ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 1998. 691 с.
2. Беляков А.С., Кузнецов В.В., Николаев А.В. // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1991. № 10. С. 79–84.
3. Левин Б.В., Сасорова Е.В. // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4/5. С. 126–133.
4. Смирнов В.Б., Пономарев А.В., Завьялов А.Д. // ДАН. 1995. Т. 343. № 6. С. 818–823.
5. Sessorova E.V., Levin B.W. // Phys. and Chem. Earth (C). 1997. V. 26. № 10/12. P. 775–780.
6. Virovlyansky A.L., Artel'ny V.V., Stromkov A.A. Acoustic Data Obtained by Hydrophone Array of Kamchatka. Proc. US–Russia Workshop on Experimental Underwater Acoustics. Nizhny Novgorod: IAPRAS, 2000. P. 33–46.