

Анализ изменений геоакустической эмиссии в процессе подготовки сильных землетрясений на Камчатке

Купцов А. В. (ikir@ikir.kamchatka.ru),
Ю.В. Марапулец, Б.М. Шевцов.

Институт космических исследований и распространения радиоволн
(ИКИР) ДВО РАН

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что землетрясениям предшествует длительный процесс подготовки. Предложено много моделей этого процесса, имеющих различия в деталях, но одинаково описывающих основные этапы подготовки. Первый из них, самый продолжительный во времени, длится годами и характеризуется накоплением упругой потенциальной энергии в гипоцентральной области. Следующий этап быстрого роста упругих напряжений, приводящих к лавинному трещинообразованию и подготовке магистрального разрыва, измеряется уже сутками или часами [1, 2]. Именно этот временной период и представляет интерес для исследований характеристик геоакустических шумов.

Известно, что сейсмоакустическая эмиссия, постоянно наблюдаемая в скважинах, туннелях, на поверхности Земли и на дне водоемов, характеризуется высокой чувствительностью к слабым изменениям состояния земной коры, связанных, в том числе, и с активным трещинообразованием [3]. Размеры трещин сравнительно малы, и вызванные ими упругие колебания находятся в более высокочастотной части спектра по сравнению с волнами, которые создаются основной фазой сейсмического события [4].

Геоакустическая эмиссия (ГАЭ) исследовалась во многих работах. Так, например, в Армении во время Спитакского землетрясения в 80 км от эпицентра было зафиксировано при магнитуде $M = 7.1$ увеличение амплитуды ГАЭ в диапазоне 800-1200 Гц за 12 часов до и после основного события [5]. В Японии аналогичный отклик ГАЭ на частотах 500 и 1000 Гц был обнаружен только в одном случае при $M = 4.5$, неглубоком (10 км) залегании очага землетрясения и дальности до эпицентра 23,5 км [6]. Этот результат был получен на сейсмологической обсерватории Мацуширо Метеорологического Агентства Японии, проводившей измерения в течение семи месяцев 1998 года, начиная с февраля, в туннели на глубине 100 м от поверхности Земли, с использованием чувствительного трехкомпонентного сейсмоакустического приемника с магнитоупругим преобразователем в частотном диапазоне до 1000 Гц [7].

Особенностью сейсмических процессов в районе полуострова Камчатка является то, что гипоцентры большинства землетрясений располагаются под дном прибрежной зоны Тихого океана. Предполагалось, что в этих условиях контроль сейсмического режима возможен посредством придонных гидроакустических систем.

Проводимые с 1986 по 1991 г. эксперименты показали, что для регистрации и исследования сейсмических сигналов килогерцового диапазона гидроакустические системы благодаря своим техническим характеристикам достаточно эффективны и имеют преимущества перед традиционно используемыми геофонами, однако их применению в этих целях препятствуют помехи от прибоя, судоходства и других источников океанических шумов [8]. Это привело к необходимости размещения приемных систем на суше в закрытых водоемах, где естественные шумы значительно меньше и хорошо контролируются.

В связи с сильным затуханием высокочастотные геоакустические сигналы не передаются на большие расстояния из очагов будущих землетрясений, а создаются вблизи пунктов наблюдений в результате трещинообразования под действием деформаций [2], дальность распространения которых определяется размером очага.

Диаграмма направленности излучения звука трещинами анизотропная [4, 9], что при выделенной ориентации трещин, например, в сдвиговых напряжениях создает анизотропию геоакустических шумов. Цель данной работы в исследовании характера геоакустических проявлений деформационных воздействий, обусловленных подготовкой сильных сейсмических событий Камчатки.

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ

Для регистрации сигналов использовались две приемные системы, установленные в небольших водоемах. Каждая система состояла из четырех совмещенных направленных приемников градиента давления, ориентированных по сторонам света (кроме запада) и вниз. Западный сектор был исключен из наблюдений вследствие анизотропии геоакустических шумов с преимущественным направлением на зону субдукции. Средняя чувствительность приемников с предусилителями в килогерцовом диапазоне составляет сотни мВ/Па. Преимущества пьезокерамических приемников перед геофонами проявляются при исследовании высокочастотных шумов.

Конструкция из четырех разнонаправленных приемников позволяет достаточно эффективно оценивать анизотропию шумов. Одна из таких систем размещена на дне укрытого бассейна размерами $2 \times 2 \times 2$ м³ в пункте комплексных геофизических наблюдений (КГЭП) на р. Карымшина (52.49° N, 158.09° E), а другая – на удалении 20-ти км к северу на дне оз. Микижа (52.60° N, 158.14° E), его площадь 200×700 м², а наибольшая глубина 4 м. Первая точка приема находится в эксплуатации с июля 1999 г., а вторая – с ноября 2001 г. В пунктах наблюдений толщина осадочных пород, наиболее препятствующих распространению высокочастотных сигналов, составляет примерно 40 и 50 м, соответственно. Измерения коэффициента поглощения звука этими породами в килогерцовом диапазоне дали величину около 200 дБ/км.

Регистрация акустических шумов со всех четырех направлений осуществлялась непрерывно через полосовые фильтры в диапазонах частот: 0.1–10, 10–50, 50–200, 200–700, 700–1500, 3000–6000, 8000–11500 Гц. Частотно разделенные сигналы через амплитудные детекторы подавались на интеграторы и после четырехсекундного накопления оцифровывались и записывались в компьютер. Одновременно, для более детального анализа, производится запись на жесткий диск акустических шумов в режиме реального времени в полосе частот 0–22 кГц, поступающих непосредственно с приемников на входы двух синхронизированных системным таймером звуковых карт.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Деление на частотные поддиапазоны позволило довольно четко отделить каналы подверженные различного рода помехам от каналов не реагирующих на них. Контролируемые метеоусловия (ветер и дождь) оказывали заметное влияние на регистрируемый сигнал в низкочастотном диапазоне, но не мешали наблюдениям высокочастотной ГАЭ. Следует отметить, что для горизонтальных датчиков имело значение направление ветра, а для вертикального приемника – только модуль скорости. На рис.1 показано, что низкочастотные каналы до 500 Гц заметно реагируют на сильный ветер, а на более высоких частотах амплитуда ветровой помехи сравнима с уровнем фоновых шумов.

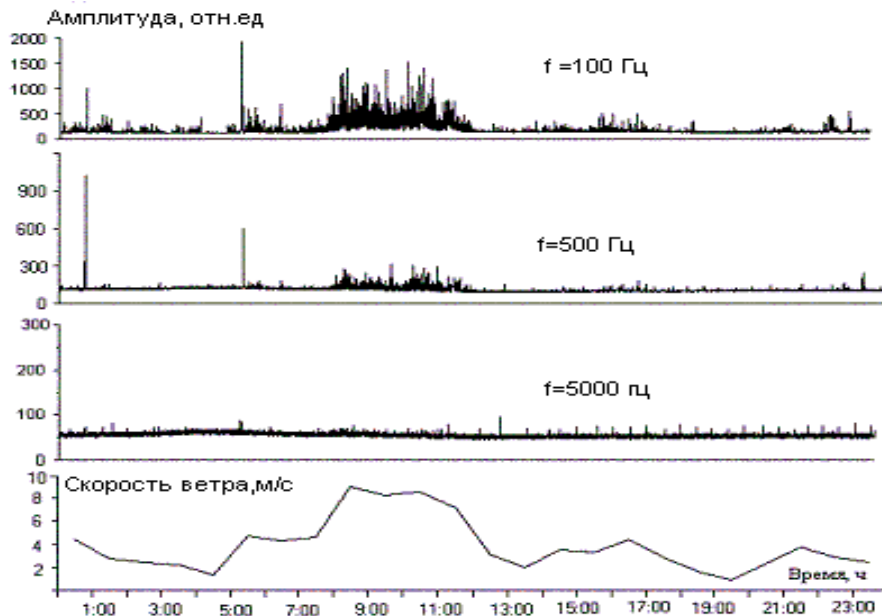


Рис.1. Влияние скорости ветра на частотные каналы.

Техногенные помехи (шум самолетов, автотранспорта и дизель-генератора) вызывали кратковременные возмущения, которые довольно просто учитывались при интерпретации данных. Вследствие промерзания почвы эти помехи, как и метеорологические, сильнее сказывались зимой, но понижались при выпадении снега. Собственные шумы промерзания почвы повышали фоновый уровень в декабре.

Для анализа сейсмической обстановки использовались данные Камчатской опытно-методической сейсмологической партии.

Предварительный анализ полученных данных показал, что ГАЭ, сопровождающая подготовку сейсмического события, зависит от его класса, расстояния до эпицентра и глубины. В соответствии с этим, за период наблюдений были отобраны события класса $K \geq 11$, $K = 1.5M + 4.65$, где $M \geq 4$ – магнитуда [10], находящиеся от пунктов наблюдений не далее 250 км.

Группа близко расположенных друг от друга землетрясений, имеющих расстояние между собой много меньше расстояния до пункта наблюдения и произошедших в суточном временном интервале, объединялась в одно событие с суммарной энергией.

На рис. 2 представлены результаты наблюдений ГАЭ с вертикального приемника. Они иллюстрируют поведение геоакустических сигналов на оз. Микижа, предшествовавших сейсмическому событию, произошедшему 18.12.2002 в 11:09:21 по UT, с координатами: 52.97° N, 159.80° E; и параметрами: $D = 113$ км, $H = 42$ км, $K = 12.1$, где K – энергетический класс, D – расстояние до эпицентра и H – глубина. Момент землетрясения здесь и всюду ниже указан на рисунке вертикальной стрелкой.

В высокочастотной части спектра за 25 часов до события наблюдалось сильное и продолжительное увеличение сигнала, многократно превышающее уровень фона. В полосе частот 3–6 кГц амплитуда сигнала максимальна и в пиковых значениях выходит за пределы динамического диапазона регистрирующей аппаратуры.

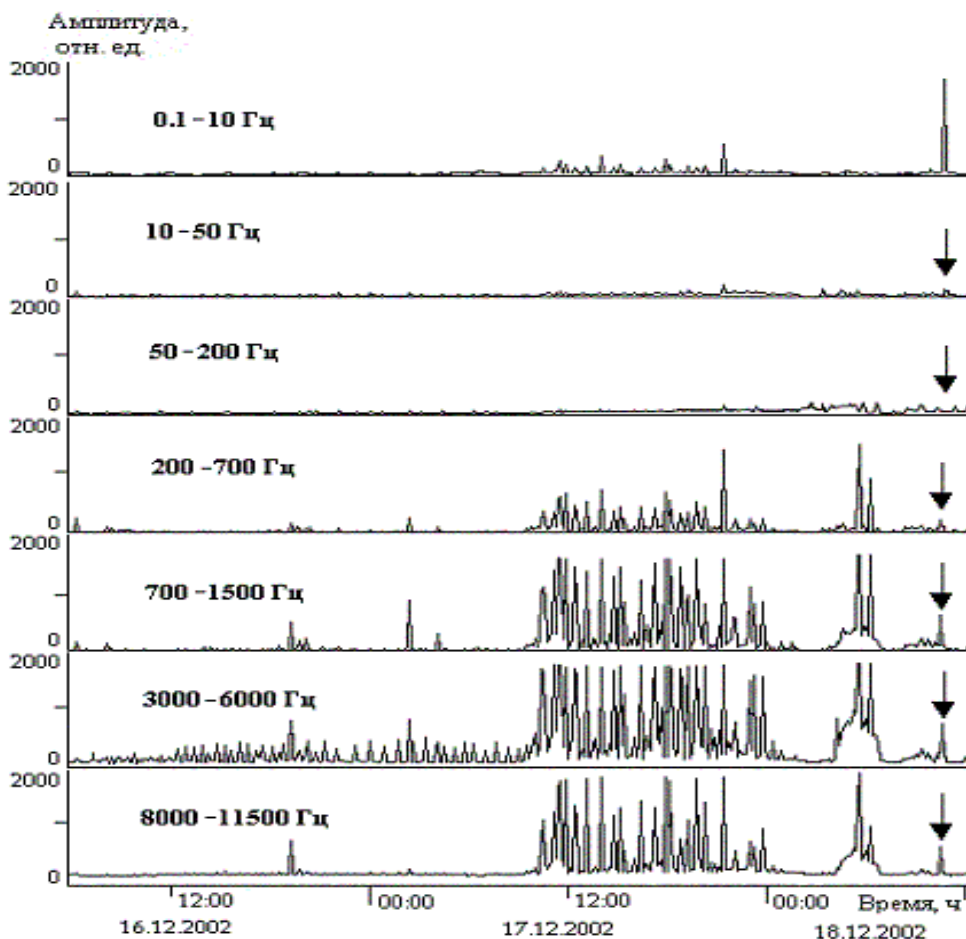


Рис.2. Геоакустические сигналы, зарегистрированные на оз. Микижа 18.12.2002 г.

Рис. 3 иллюстрирует поведение геоакустических сигналов на оз. Микижа перед сейсмическим событием, произошедшим 23.05.2004 года в 03:06 по UT, координаты 51.884° N , 158.81° E ; параметры: $D = 130 \text{ км}$; $K = 10.6$. 22 мая в 01:30. В данном случае сигналы, продолжительностью около 14 часов, с большим превышением над фоновым уровнем возникли на высоких частотах за 25 часов до основной фазы события. Следует отметить, что столь интенсивные и продолжительные сигналы в другие интервалы времени, кроме как за 1-2 суток до сильного события, не наблюдаются.

При прослушивании этого участка записи в режиме реального времени четко выделялись звуки, напоминающие скрежет, вздохи, резко нарастающий шум и свисты. На рис 4 представлен 3-х минутный фрагмент этой записи.

Сигналы и звуки, сопровождающие высокочастотные возмущения не всегда одинаковы. Так например, возмущения, предшествующие событию от 06.04.2004 года в 09:54, (53.765° N , 160.58° E ; параметры: $D = 177 \text{ км}$; $K = 11.5$), продолжались также в течении нескольких часов, но обуславливались квазипериодическими повторяющимися импульсами, по форме напоминающими микросейсм и звучали как короткие свисты. На рис.5 представлен 3-х минутный фрагмент группы сигналов, на рис.6 – форма одиночного сигнала.

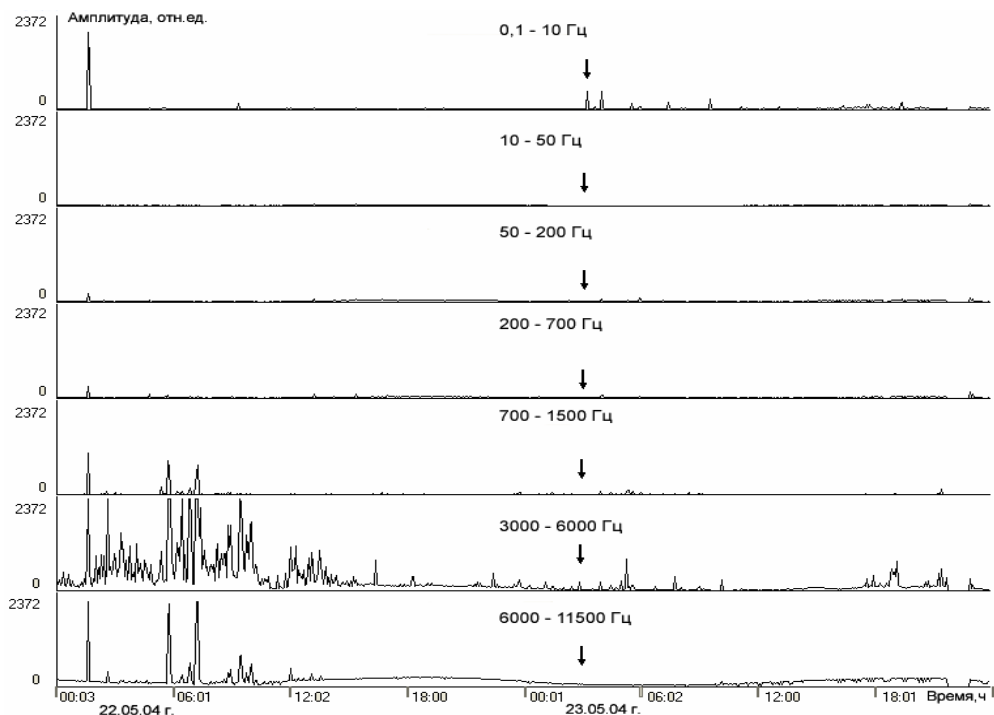


Рис.3. Геоакустические сигналы, зарегистрированные на оз. Микижа 23.05.2004 г.

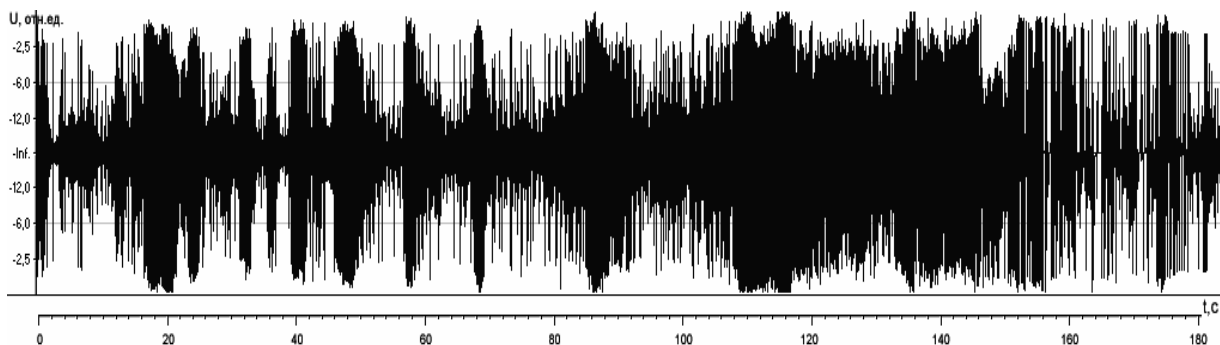


Рис.4. Фрагмент записи геоакустических возмущений.

Разнообразие форм геоакустических аномалий, наблюдавшихся в наиболее информативном частотном диапазоне 3–6 кГц, показано на рис. 7 (а, б – КГЭП Карымшина; в, г – КГЭП Микижа). Характеристики событий, представленных на рис. 7:

- а – 13.11.1999 в 21:24:46 по UT, 52.98° N, 160.16° E; $D = 140$ км, $H = 11$ км, $K = 12,1$;
- б – 16.10.2002 в 10:12:22 по UT, 51.65° N, 157.95° E; $D = 132$ км, $H = 112$ км, $K = 13,3$;
- в – 29.05.2003 в 05:59:44 по UT, 50.83° N, 157.83° E; $D = 224$ км, $H = 43$ км, $K = 13,0$; и 29.05.2003 в 18:40:54 по UT, 51.28° N, 158.63° E; $D = 176$ км, $H = 69$ км, $K = 11,1$;
- г – 26.04.2002 в 07:15:10 по UT, 53.45° N, 160.79° E; $D = 190$ км, $H = 43$ км, $K = 13,1$.

При анализе сигналов на рис. 7 хорошо видна зависимость амплитуды аномалий от расстояния до гипоцентра и энергетического класса. Был найден коэффициент корреляции между энергией всех наблюдавшихся сейсмических событий с $K \geq 11$ и энергией их геоакустических аномалий в частотном диапазоне 3–6 кГц с учетом экспоненциального закона затухания деформаций в зависимости от расстояния между гипоцентром и пунктом наблюдения. Он оказался равен 0.3, что указывает на наличие случайных факторов, влияющих на распространение деформаций и преобразование их в акустическое излучение.

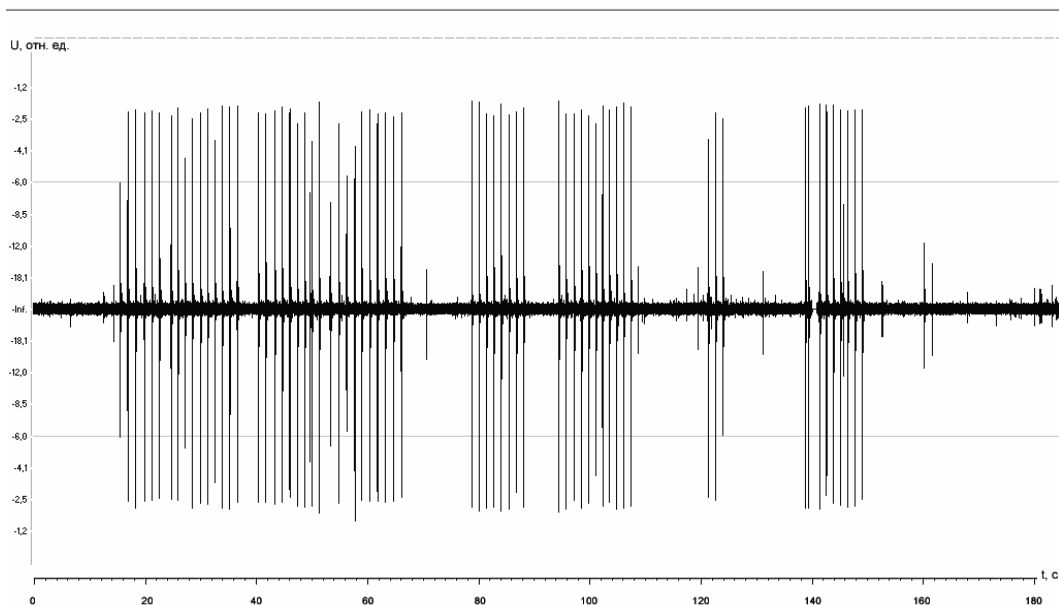


Рис.5. Фрагмент записи геоакустических возмущений.

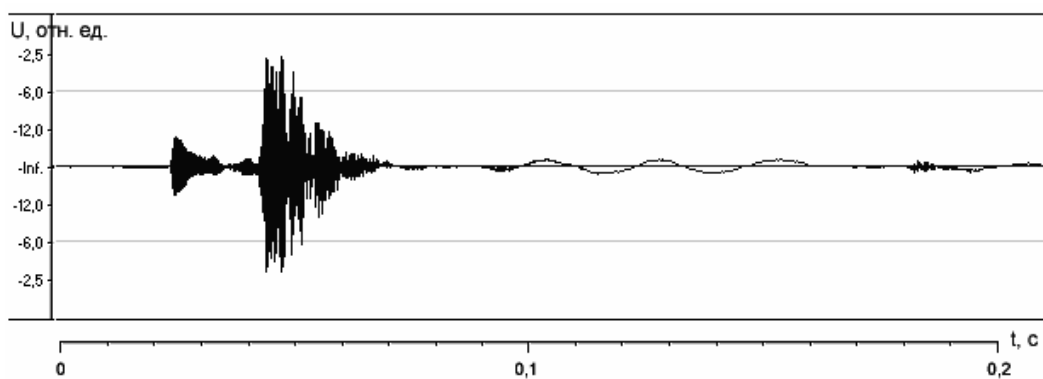


Рис.6. Фрагмент записи геоакустических возмущений.

Следует отметить, что не все сильные события, а только примерно их половина предваряется аномальными сигналами. Если учесть, что сильные события происходят примерно раз в месяц, то вероятность случайности появления аномалий в одном наблюдении не превышает $1/30$, а в N наблюдениях – $(1/30)^N$. Даже при небольшом N вероятность случайного появления аномалий становится пренебрежимо малой.

Для анализа данного явления на карте, представленной на рис.8 (А– КГЭП Карымшина; Б– КГЭП Микижа) были отмечены местоположения эпицентров землетрясений с $K \geq 11$, которые наблюдались в двух пунктах. События обозначены по признаку появления или отсутствия геоакустических аномалий. Кружками обозначены землетрясения, которым предшествовали аномальное повышение сигнала геоакустической эмиссии, крестиками – отсутствовали. Под отсутствием аномалий понимается сигнал, сравнимый по амплитуде с фоном и поэтому ненадежно выделяемый. Видно, что события с различными проявлениями группируются в отдельных областях, не перемешиваясь друг с другом. Эти области во многом повторяются на двух рисунках с учетом того, что пункты наблюдений разнесены и находятся в различных условиях распространения деформаций. Следует отметить, что за период наблюдений ГАЭ на Камчатке зарегистрировано около 90 сильных сейсмических событий с $K \geq 11$.

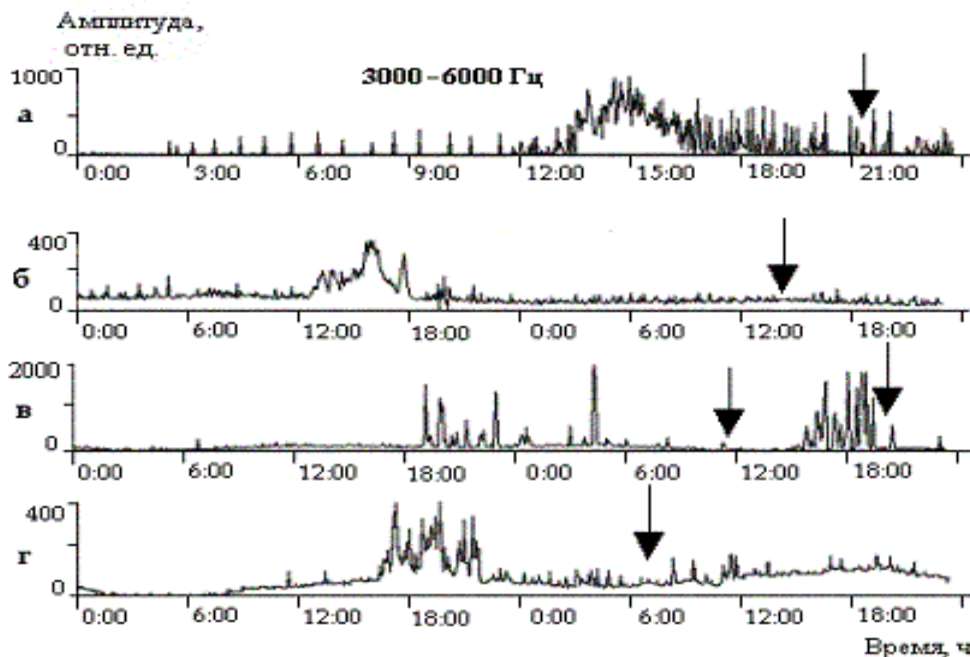


Рис.7. Разнообразие форм высокочастотных геоакустических аномалий, зарегистрированных на р. Карымшина (а и б) и на оз. Микижа (в и г).

Это меньше числа таких землетрясений по каталогу, что объясняется простоями регистрирующего оборудования. После объединения близких по пространству и во времени сейсмических событий получилось 46 наблюдений на измерительном пункте «Карымшина» и 28 – на оз.Микижа. Из 46 наблюдений на р. Карымшина 18 имели аномальное повышение уровня акустического сигнала в высокочастотной части спектра примерно за сутки до события, что составляет 39%. Из 28 наблюдений на оз. Микижа 16 имели геоакустический отклик (57%). В среднем – 48%. Число одновременных наблюдений меньше 28, поскольку не всегда оба пункта работали одновременно. Из анализа пространственного распределения событий можно заключить, что к юго-востоку от м. Шипунского находится область с очень слабой передаточной функцией деформационных влияний. Возможно, это связано с системой основных разломов, которые изображены на рис. 5 и 6 пунктирными линиями [11], точки регистрации лежат по обе стороны одного из них, и со свойствами пластичности пород самой области. Из прилегающих к пунктам наблюдений областей деформации передаются достаточно эффективно. Очевидно, что расширение сети пунктов наблюдений позволит уменьшить зоны расположения эпицентров землетрясений, не имеющих предшествующего им аномального сигнала.

Анализ информации, представленной на рис. 8, позволяет сделать вывод, что энергия геоакустических аномалий существенно зависит не только от параметров сейсмического события, энергетического класса и расстояния до гипоцентра, но и от его местоположения, что связано с естественной неоднородностью сейсмического полигона.

Используемые приемники градиента давления регистрируют его проекцию на ось, что дает возможность вычислить направление прихода возмущения ГАЭ. Для анализа данного явления были отобраны несколько аномальных сигналов, предшествующих сейсмическим событиям, амплитуда которых не превышала динамический диапазон измерительного тракта, т.е. не аппаратура не находилась в режиме ограничения. Пример такого сигнала рассмотрен на рис.9. Слева на рисунке представлены диаграммы по

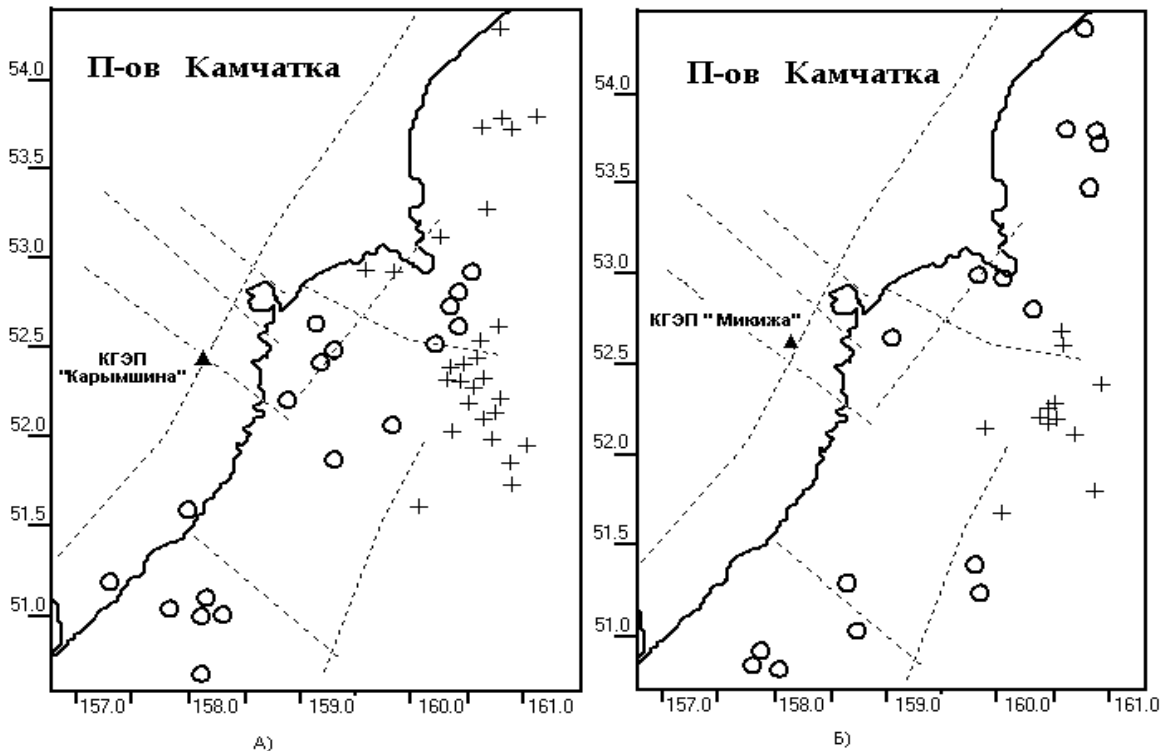


Рис.8. Пространственное распределение землетрясений, подготовка которых наблюдалась на р. Карымшина и оз. Микижа: ▲ – пункт наблюдений, ○ – событие с геоакустической аномалией, + – событие без аномалии.

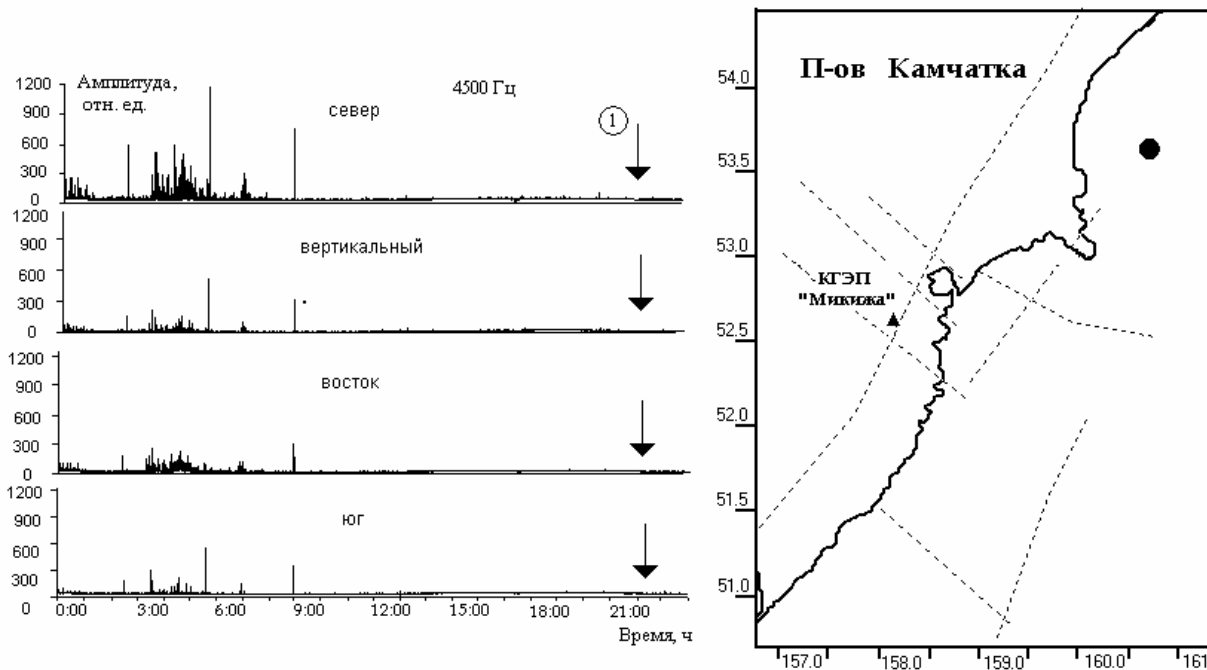


Рис.9. Геоакустические возмущения перед сейсмическим событием, зарегистрированные на оз. Микижа по всем направлениям и расположение эпицентра события. направлениям в том же частотном диапазоне. Из рисунка видно, что наиболее сильный сигнал поступил с северного датчика, более слабый – с восточного, и очень слабый – с южного.

Складывая амплитуды как вектора получим северо – восточное направление. Справа на рисунке заштрихованным кружком отмечено расположение эпицентра землетрясения, которому предшествовал данный аномальный сигнал, а треугольником

обозначено местоположение измерительного пункта. Видно, что фактическое и расчетное направления примерно совпадают.

На диаграмме, представленной на рис.10, показаны результаты анализа 10 аномальных сигналов (светлыми прямоугольниками изображены фактический азимут на эпицентр событий, черными – расчетный азимут прихода аномального сигнала, заштрихованными – разница между ними). Разброс в полученных результатах (разница составила от 2 до 54 градусов) можно объяснить тем, что в течение времени накопления (4 секунды) вместе с интересующим нас сигналом одновременно регистрируются и другие геоакустические сигналы, которые и вносят ощутимую погрешность в расчеты.

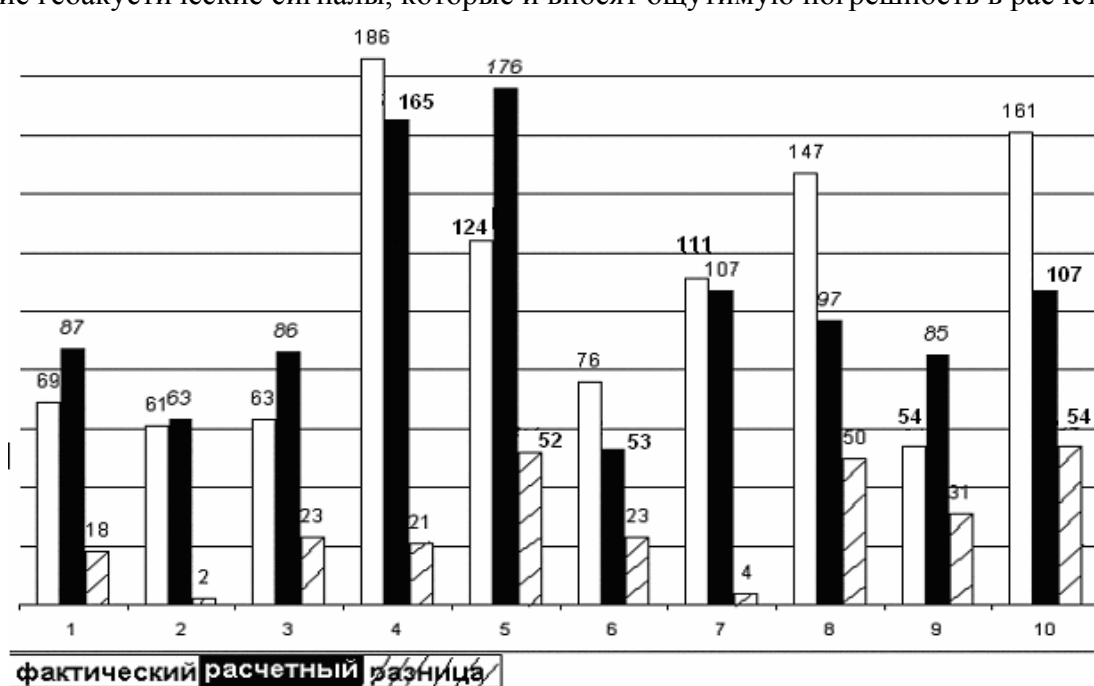


Рис.10. Азимут на сейсмические события и расчетный азимут на аномальные сигналы, предшествующий этим событиям.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что направление на источник сигнала, соответствующего процессу подготовки сейсмического события, совпадает с направлением на эпицентр готовящегося землетрясения.

ВЫВОДЫ

1. Исследованы характеристики высокочастотных геоакустических шумов, предшествующих сильным сейсмическим событиям на Камчатке.
2. Показано, что примерно за сутки до основной фазы события возникают аномалии в поведении сигналов, амплитуда которых зависит от энергетического класса и местоположения землетрясения.
3. Определены области пространственного распределения событий по признаку появления или отсутствия геоакустических аномалий.
4. Показаны информативность килогерцового диапазона в наблюдениях геоакустических аномалий и незначительность помех в высокочастотной части спектра.
5. Пеленг на источник аномального сигнала, предшествующий сильному сейсмическому событию, совпадает с пеленгом на эпицентр самого готовящегося события.

Работа выполнена при поддержке проектов ДВО РАН № 04-1-02-008 и РФФИ № 03-05-65302.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Райс Дж. Механика очага землетрясений. М.: Мир. 1982. 217 с.
2. Соболев А. Г., Пономарев А. В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука. 2003. 270 с.

3. Беляков А. С., Кузнецов В. В., Николаев А. В. Акустическая эмиссия в верхней части земной коры. // Физика Земли. 1991. № 10. С. 79 – 84.
4. Крылов В. В. Об излучении звука развивающимися трещинами. // Акустический журнал. Т. XXIX. Вып. 6. 1983. С. 790-798.
5. Моргунов В. А., Любошевский М. Н., Фабрициус В. З., Фабрициус З. Э. Геоакустический предвестник Спитакского землетрясения. // Вулканология и сейсмология. 1991. № 4. С. 104 – 106.
6. Горбатиков А. В., Молчанов О. А., Хаякава М. и др. Отклик акустической эмиссии на сейсмический процесс. // Вулканология и сейсмология. 2001. № 4. С. 66 – 78.
7. Беляков А. С., Николаев А. В. Сейсмоакустические приемники с магнитоупругим преобразованием. // Физика Земли. 1993. № 7. С. 74-80.
8. Олещук В. Ю., Смирнов Г. Е. Исследования влияния сейсмической активности на шумы океана. Акустический институт им.ак.Андреева. Тихоокеанский филиал. 1991. 222с.
9. Чернышев С. Н. Трещины горных пород. М.: Наука, 1983. 240 с.
10. Федотов С. А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука. 1972. 116 с.
11. Аносов Г. И., Биккенина С. К., Попов А. А. и др. Глубинное сейсмическое зондирование Камчатки. М.: Наука. 1978. 130 с.