

Ларионов И.А., Шевцов Б.М.

*Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
с. Паратунка, Камчатский край, Россия igor@ikir.ru*

Введение

Одновременные исследования акустической эмиссии и деформаций проводились в основном в скважинах и шахтах на глубинах, достаточных для исключения влияния атмосферных и техногенных факторов, а также в лабораторных условиях. В то же время для приповерхностных осадочных пород такие работы практически отсутствовали, поскольку считалось, что для них нельзя получить надежных результатов, как в связи с высоким уровнем помех, так и с нестабильностью их реологических свойств из-за сильного влияния внешних условий.

Актуальность изучения деформаций осадочных пород обусловлена их важной ролью во многих геофизических процессах, которые рассматриваются в сейсмологии, океанологии, горном деле и т.д. Широкий круг природных явлений в осадочных породах связан с их малой прочностью и высокой пластичностью, которые существенно зависят от внешних факторов. Благодаря этим свойствам даже низкие напряжения в таких средах вызывают появление хорошо регистрируемых акустических сигналов, что и было обнаружено в ряде работ по исследованию геоакустических предвестников землетрясений [9, 10], но как они связаны с характеристиками деформационного процесса, этот вопрос оставался открытым. Так же необходимо было выяснить, каковы масштабы этого процесса, и возможна ли связь деформационных изменений в пунктах наблюдений с источниками напряжений в областях, которые удалены на сотни километров.

Для решения задач по исследованию свойств и эффективности генерации высокочастотной геоакустической эмиссии в приповерхностных осадочных породах в условиях активизации деформационных процессов использовался комплекс наблюдений, в который входили системы регистрации геоакустических сигналов, лазерный деформограф, средства контроля метеопараметров, а также коммуникационная система сбора и передачи данных.

Методика измерений

В системе регистрации геоакустических сигналов используется приемная система направленных акустических приемников, установленная в небольшом искусственном водоеме [5]. С выходов гидрофонов сигналы в диапазоне частот 0.1-11000 Гц усиливаются, фильтруются по частотам 0.1-10, 10-50, 50-200, 200-700, 700-1500, 1500-7000, 7000-11000 Гц, подаются на амплитудные детекторы, накапливаются за 4 с, оцифровываются и регистрируются в компьютере. Подробно система наблюдений описана в работе [7]. Для более детального анализа связи геоакустической эмиссии с деформационным процессом на опору уголкового отражателя деформографа был установлен дополнительный гидрофон. Контролируемые метеоусловия (ветер и дождь) оказывали заметное влияние на регистрируемый сигнал в низкочастотном диапазоне, но не мешали наблюдениям высокочастотной геоакустической эмиссии. Для анализа сейсмической обстановки использовались данные Камчатского филиала геофизической службы РАН.

Для регистрации деформаций осадочных пород использовался лазерный интерферометр-деформограф, собранный по схеме интерферометра Майкельсона, установленный с удалением 70 м от акустической системы на обсадных трубах двух пятиметровых сухих скважин, разнесенных на 18 м и работающий в режиме разнесенных пучков, который реализуется применением в качестве отражающих элементов зеркал и трипсельпризменного отражателя [1]. Длина большого (измерительного) плеча интерферометра равна 18 м (соответственно оптическая длина 36 м), длина малого (опорного) – 0.1 м. Долговременная нестабильность частоты лазера не хуже $2 \cdot 10^{-9}$, а погрешность воспроизведения частоты лежит в пределах $1 \cdot 10^{-7}$. Элементы, формирующие интерференционную картину, находятся в теплоизолированном отапливаемом боксе, в котором вариация температуры в летний период составляет $\pm 10^0$ С, а в зимнее время – остается практически неизменной, вследствие заметания снегом из-за обильных снегопадов. Изменение атмосферного давления оказывает существенное влияние на регистрируемое значение деформации в спокойное время, однако при увеличении деформационных процессов это влияние утрачивает силу. Для удаления из регистрируемого сигнала метеорологической составляющей был применен метод

дифференцирования и в результате получена временная зависимость скорости изменения деформаций. Зависимость от скорости ветра и его направления проявляется в летний период из-за отсутствия снежного покрова, но, регистрируя метеопараметры в точке наблюдений, все описанные влияния легко учитываются при интерпретации данных.

Результаты исследования

При анализе акустического сигнала (рис. 1) обнаруживается достаточно простая его структура, представляющая собой череду случайных импульсов ударного происхождения с частотой заполнения около нескольких кГц. При наблюдаемом времени затухания 0.02 с и примерной скорости 1.5 км/с поперечных колебаний в земной коре длина ослабления сигнала на частоте 3 кГц получается 30 м. Коэффициент ослабления при этом будет 193 дБ/км, что характерно для осадочных пород.

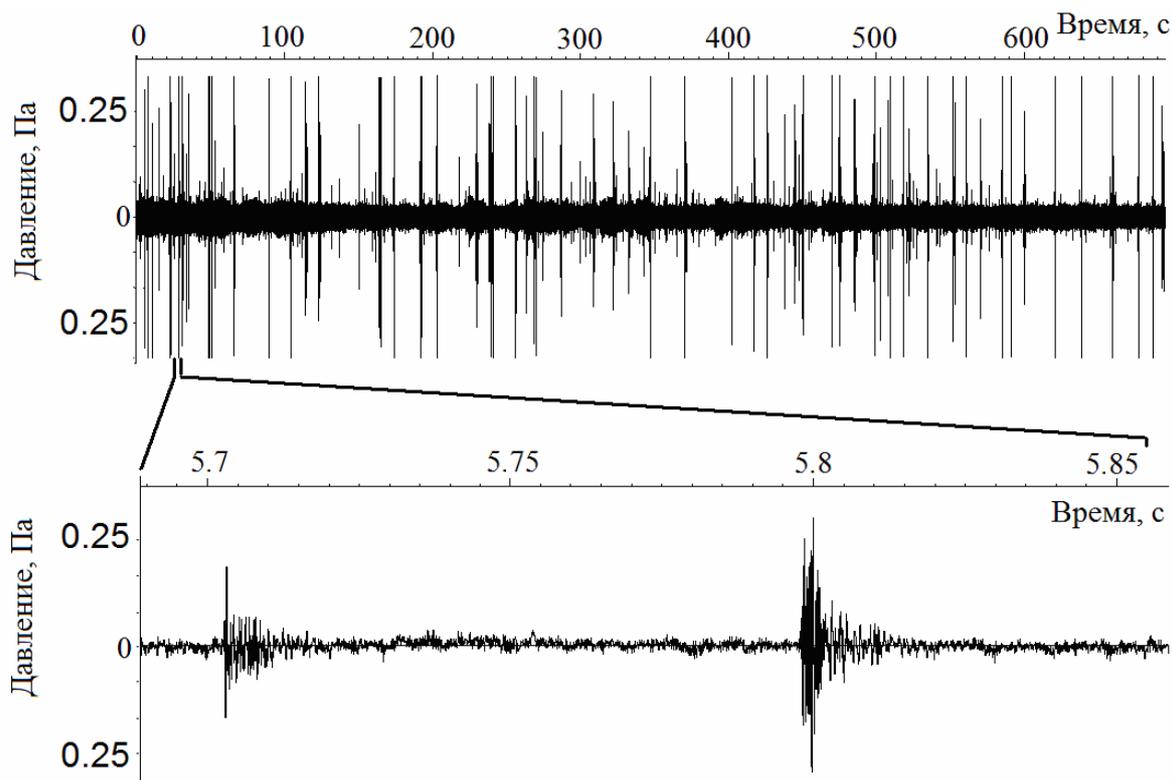


Рис. 1. Пример сигнала геоакустического шума (верхняя кривая). На нижнем графике представлен увеличенный фрагмент сигнала

Наблюдаемые геоакустические импульсы с некоторым фоновым уровнем формируют геоакустическую эмиссию. Как показано в работах [2-4, 6], геоакустическая эмиссия в обычном спокойном состоянии имеет низкий фоновый уровень и относительно редкую частоту следования импульсов. Однако, как правило, в преддверии сильных сейсмических событий, на расстояниях не более 200 км, геоакустическая эмиссия на протяжении 6-12 часов имеет возмущенный вид. Он определяется повышенным фоновым уровнем и увеличенной амплитудой и частотой следования высокочастотных импульсов (рис. 2).

Повышение интенсивности высокочастотной геоакустической эмиссии в приповерхностных осадочных породах на существенном расстоянии от эпицентров сейсмических событий обусловлено ростом локальных напряжений, характер изменения которых в связи с этим эффектом остается все еще невыясненным. Такие свойства шумов можно объяснить высокой чувствительностью геоакустической эмиссии к деформационным процессам, возникающим в период подготовки землетрясений.

С целью исследования данных эффектов были выполнены непосредственные измерения деформаций земной поверхности одновременно с геоакустическими наблюдениями в период активизации сейсмического процесса. В эксперименте зафиксировано возмущенное, с точки зрения ежедневного спокойного суточного хода, поведение деформационного процесса – резкие колебания, которые имели большую амплитуду, около 1 мкм (рис. 3). Данное явление произошло за сутки до сильного сейсмического события, и его длительность составила около 8 часов.

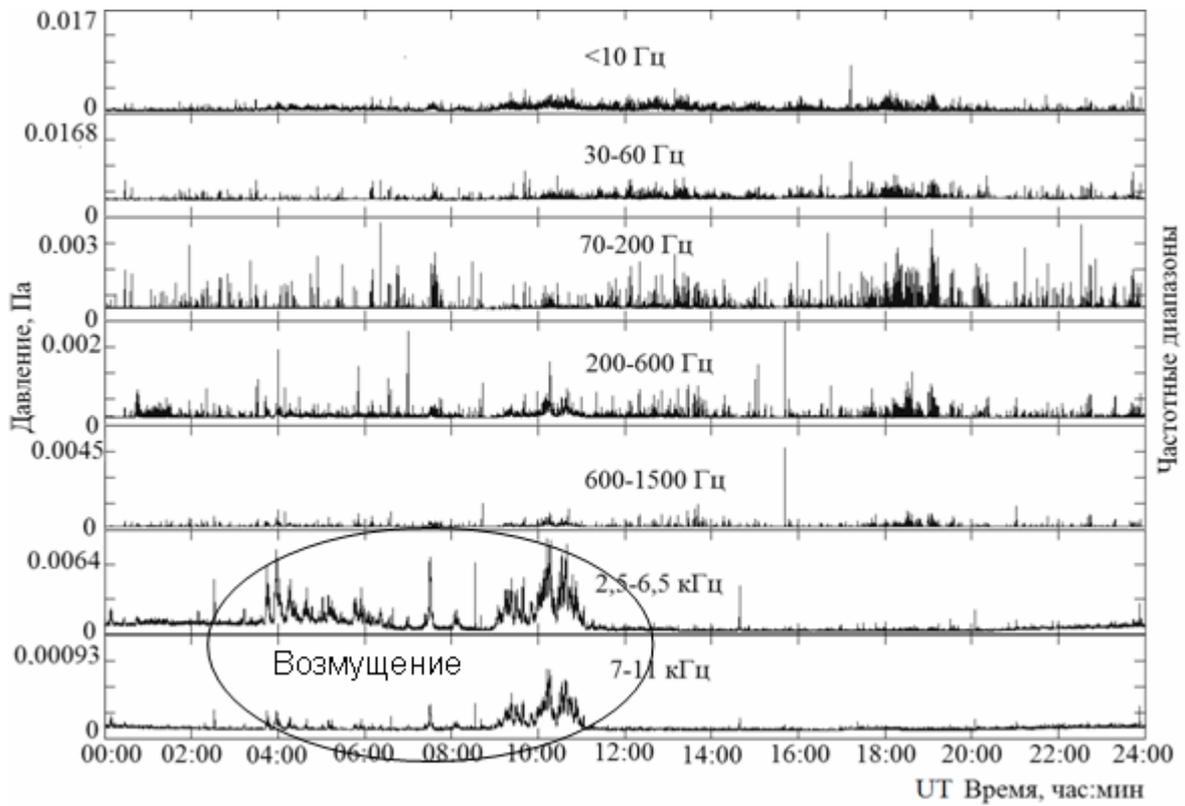


Рис. 2. Пример возмущения в высокочастотной области геоакустической эмиссии.

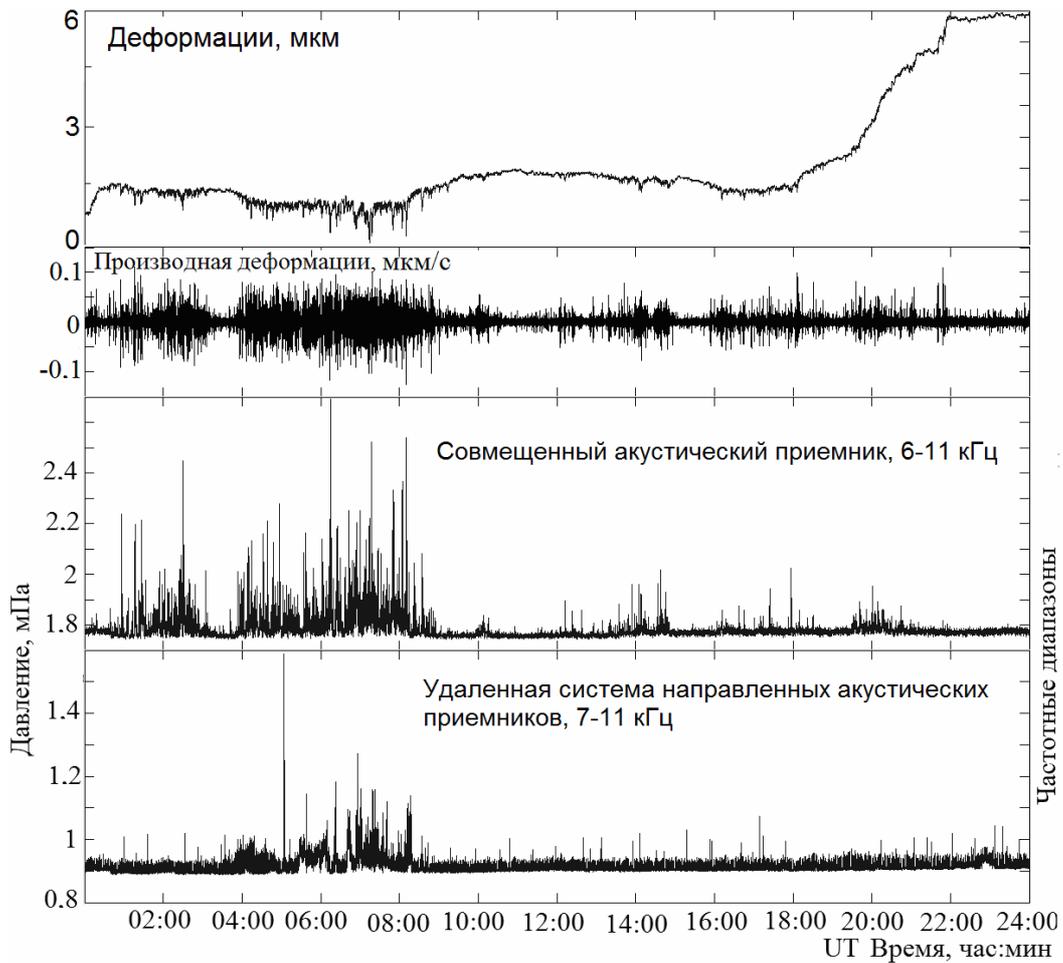


Рис. 3. Данные деформографа и соответствующие ему геоакустические аномалии 1 мая 2007 г.

Анализ геоакустической эмиссии, за тот же период времени выявил резкое повышение амплитуды сигнала, причем с датчика, расположенного на опоре деформографа, рассматриваемое повышение наиболее полно совпадает с данными деформографа, а у удаленной акустической системы аномальное повышение амплитуды соответствует области максимальных деформаций.

По данным, приведенным на рис. 3, в интервале времен 0-12 часов, где быстрые изменения деформаций производят более сильный акустический эффект, были выполнены расчеты нормированных корреляционных функций сигналов акустических приемников, удаленных и совмещенных, с показаниями деформографа. Результаты вычислений показаны на рис. 4.

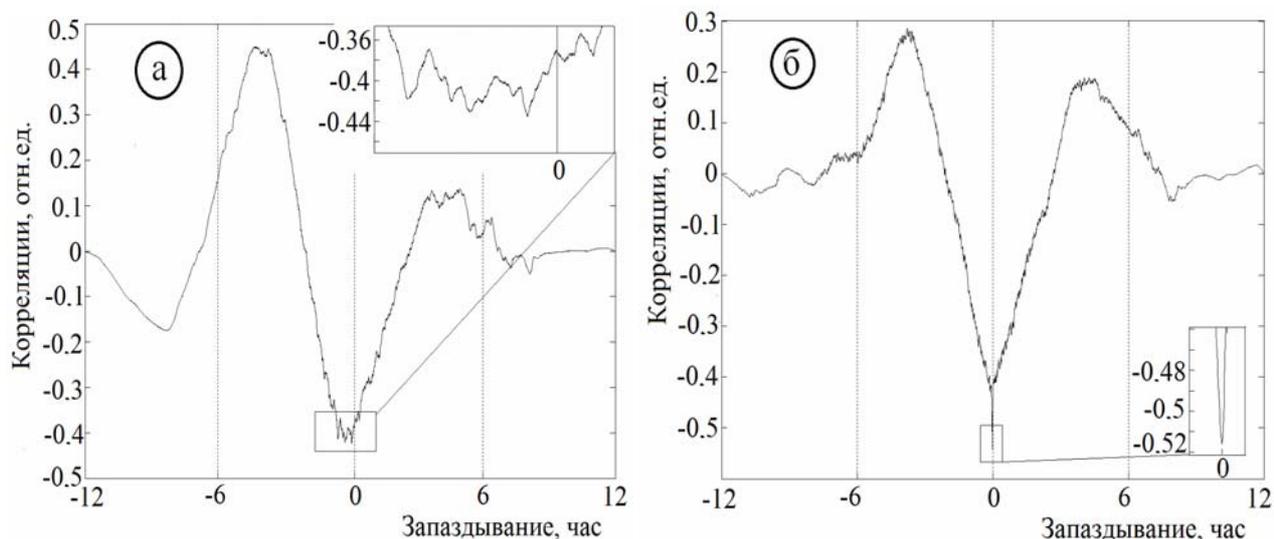


Рис. 4. Нормированные корреляционные функции сигналов удаленного акустического датчика (а) и совмещенного приемника (б) с показаниями деформографа.

Взаимные корреляционные функции имеют временной масштаб около 4 часов, видимо, связанный с характерным временем деформационно-акустических возмущений, (рис. 3). На рис. 4а виден отрицательный временной сдвиг около 13 мин, который говорит о том, что деформации приходили примерно с севера-востока, что хорошо согласуется с данными системы направленных акустических приемников.

По временному сдвигу 13 мин между сигналами акустического приемника и деформографа и расстоянию 70 м между точками наблюдений можно найти скорость деформационных возмущений, которая получается около 0.1 м/с (8.64 км/сут). Полученное значение, соответствует скорости, так называемых, медленных деформационных волн и подтверждается работами [8].

Волны такого типа связывают со скручиванием и переупаковкой в породах, что, возможно, объясняет необычные однополярные колебания в деформациях на рис. 3а.

На рис. 4б временного сдвига нет и виден еще узкий пик в нуле, указывающий на повышенные корреляции быстрых деформационных колебаний и всплесков геоакустической эмиссии.

Для оценки корреляций геоакустического сигнала и модуля скорости деформаций использовался весь ряд данных на рис. 3. Графики взаимных корреляционных функций показаны на рис. 5. Величина задержки акустического сигнала удаленного приемника относительно скорости деформационного процесса составила 18.5 мин (рис. 5а). Это небольшое изменение по сравнению с предыдущим случаем, рис. 4а, если учесть, что длина обрабатываемого ряда увеличилась вдвое.

На рис. 5а, как и на рис. 4а, виден узкий пик, характерный для акустического приемника, совмещенного с деформографом. Спад корреляций по мере удаления акустического приемника от деформографа позволяет оценить длину затухания акустических сигналов – первые десятки метров, что хорошо согласуется с выводами, полученными из анализа характеристик сигналов.

Наряду с результатами, представленными на рис. 4 и 5, найдены кросскорреляционные функции сигналов акустических датчиков, удаленного и совмещенного. Зависимости повторяют в целом кривые 4а и 5а. Автокорреляционные функции всех трех сигналов имеют одинаковые часовые масштабы и незначительно отличаются на минутных интервалах, что, видимо, связано с особенностями работы каждого из датчиков.

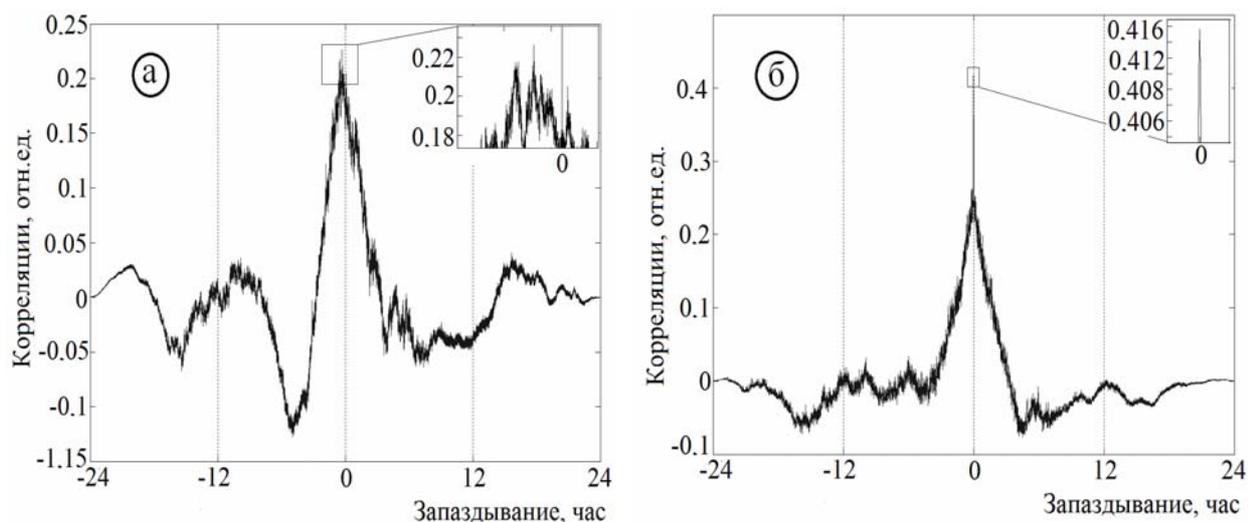


Рис. 5. Нормированные корреляционные функции сигналов удаленного акустического датчика (а) и совмещенного приемника (б) со скоростью деформаций.

Заключение

Таким образом, показано, что геоакустическая эмиссия индуцируется локальными деформационными процессами, распространяющимися с определенными скоростями и в заданных направлениях, а интенсивные деформационно-акустические возмущения возникают, как правило, в периоды подготовки сейсмических событий и могут рассматриваться в качестве комплексных предвестников землетрясений.

Список литературы

1. Долгих Г.И., Валентин Д.И., Ковалев С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В., Фищенко В.К. Применение лазерных деформографов вертикальной и горизонтальной ориентации в геофизических исследованиях переходных зон // Физика Земли. 2002. №8. С. 69-73.
2. Купцов А.В. Исследование сейсмоакустических сигналов камчатских землетрясений с использованием векторных гидроакустических приемников // Сб. II межд. совещ. «Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений». Петропавловск-Камчатский, 2001. С. 60-61.
3. Купцов А.В., Ларионов И.А., Марапулец Ю.В., Шевцов Б.М. Сравнительный анализ сигналов геоакустической эмиссии с разнесенных гидроакустических систем // Тез. междунар. научного симпозиума «Проблемные вопросы островной и прибрежной сейсмологии (ОПС-2005)». Южно-Сахалинск, 2005. С. 64-65.
4. Купцов А.В., Ларионов И.А., Марапулец Ю.В., Щербина А.О. Геоакустическая система мониторинга и прогнозирования сейсмической активности на полуострове Камчатка // Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям (SCM 2005). Сборник докладов. С.-Пб., 2005. Т.2. С. 159-161.
5. Купцов А.В., Ларионов И.А., Шевцов Б.М. Особенности геоакустической эмиссии при подготовке камчатских землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2005. №5. С. 45-59.
6. Купцов А.В., Ларионов И.А., Шевцов Б.М. Экспериментальные исследования аномалий геоакустической эмиссии, соответствующей ранней стадии развития сейсмических событий // Вестник КРАУНЦ. Серия науки о Земле. 2004. № 3. С. 46-52.
7. Купцов А.В. Изменение характера геоакустической эмиссии в связи с землетрясением на Камчатке // Физика Земли. 2005. № 10. С. 59-65.
8. Николаевский В.Н. Разломы земной коры и тектонические волны // Электронный научно-информационный журнал «Вестник ОГГГН РАН», №1(16), 2001, М.: ОИФЗ РАН, 2001.
http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dggms/1-2001/nikolaevsky.htm#begin
9. Соболев Г.А., Асагрян Х.О., Салов Б.Г. Акустическая эмиссия при разрушении материала в условиях фазового перехода // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1989. № 1. С. 38-43.
10. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестников. М.: Наука, 2003. 270 с.