На правах рукописи

All

ЩЕРБИНА Альберт Олегович

ИЗМЕНЕНИЕ НАПРАВЛЕННОСТИ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ГЕОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В ПЕРИОДЫ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Специальность – 01.04.06 «Акустика»

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

с. Паратунка, Елизовский район, Камчатский край – 2010

Работа выполнена в Институте космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН

Научный руководитель:	кандидат технических наук, доцент Марапулец Юрий Валентинович		
Официальные оппоненты:	доктор физико-математических наук Дзюба Владимир Пименович		
	кандидат технических наук Тагильцев Александр Анатольевич		
Ведущая организация:	Кафедра гидроакустики и ультразвуковой тех- ники Дальневосточного государственного тех- нического университета		

Защита диссертации состоится 02 июля 2010 года в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 005.017.01 при Тихоокеанском океанологическом институте им. В.И. Ильичева ДВО РАН по адресу: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН.

Автореферат разослан « <u>28</u> » <u>мая</u> 2010 года.

Ученый секретарь диссертационного совета доктор технических наук, профессор

Корсто Коренбаум Владимир Ильич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Акустическая эмиссия – излучение упругих волн, возникающее в процессе перестройки внутренней структуры твердых тел при деформациях. Источниками эмиссии является дислокации или трещины, которыми генерируется импульсный сигнал с характеристиками фликкер-шума.

В лабораторных условиях акустико-эмиссионный контроль позволяет изучать процессы деформации и разрушения материалов. В геофизике метод акустикоэмиссионного контроля широко применяется при изучении состояния горных пород. Упругие колебания могут наблюдаться в широком диапазоне длин волн (от тысяч километров сейсмических волн в земной коре до нанометров дислокационных подвижек и связанных с ними колебаний в различных средах). В геофизике принято рассматривать акустическую эмиссию в четырех частотных диапазонах: сейсмическом (от долей до 10 Гц), высокочастотном сейсмическом (10-100 Гц), сейсмоакустическом (100-1000 Гц) и акустическом (более 1 кГц).

На камчатском геодинамическом полигоне ИКИР ДВО РАН (Камчатский край, Елизовский район, с. Паратунка) проводятся исследования геоакустической эмиссии в частотном диапазоне от 0.1 Гц до 10 кГц с помощью гидрофонов, установленных в естественных и искусственных водоемах. В результате исследований было установлено, что в суточном временном интервале до готовящегося землетрясения, наблюдается повышение интенсивности геоакустической эмиссии. Этот эффект наиболее ярко проявляется в килогерцовом диапазоне частот и определяется деформациями пород в пунктах наблюдений на удалении первых сотен километров от эпицентров готовящихся землетрясений. Механизм возникновения описываемого объясняется следующим образом. В моменты подготовки сильных сейсмических событий под действием деформационных сил на обширной площади Земной коры с радиусом порядка сотен километров вокруг их эпицентров накапливаются напряжения. После превышения ими определенного порога наступает период деформационных возмущений с лавинообразным растрескиванием пород и проскальзыванием пластов по существующим разломам, что сопровождается характерным повышением уровня геоакустической эмиссии, проявляющимся как в увеличении амплитуды отдельных импульсов, так и в существенном увеличении их потока (числа импульсов в единицу времени).

Актуальным остается вопрос исследования направленности регистрируемого в такие моменты времени акустического излучения, которая, по всей видимости, будет зависеть как от ориентации отдельных источников, так и от их пространственного распределения. Поэтому, проанализировав распределение потока геоакустических сигналов и их характеристики по направлениям, можно оценить ориентацию осей напряжений и выделить направление на источник деформационных возмущений. Это может быть использовано, например, для изучения тектонических процессов, создания методов локации областей повышенных напряжений и оценки уровня сейсмической опасности. В ранних работах, проводимых в ИКИР ДВО РАН, предпринимались попытки оценить направленность геоакустического излучения, однако конструктивные особенности использованных приемников не позволили в полной мере исследовать эти свойства. В дальнейшем система геоакустических наблюдений была модернизирована. Вместо пяти направленных гидрофонов была установлена комбинированная приемная система, включающая гидрофон с круговой характеристикой направленности и трехкомпонентный векторный приемник, позволяющий регистрировать в той же точке пространства три компоненты градиента звукового давления. Используя эти данные можно достаточно легко определять пеленг акустических сигналов.

Приемная система с такими возможностями, установленная вблизи дна водоема и позволяющая регистрировать сигналы геоакустической эмиссии в частотном диапазоне от 5 до 11000 Гц, использовалась впервые. Данные наблюдений, полученные в течение пятилетнего периода, позволили исследовать характеристики геоакустической эмиссии как при деформационных возмущениях, так и во время их отсутствия. Среди особенностей эмиссии в периоды подготовки землетрясений отмечаются сильные вариации интенсивности акустических сигналов и изменение их пеленга, исследованию которых и посвящена данная работа.

Предмет исследования – характеристики высокочастотной геоакустической эмиссии осадочных пород.

Цель работы – исследование изменений направленности высокочастотной геоакустической эмиссии в периоды деформационных возмущений.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- Разработка метода автоматизированного обнаружения геоакустических импульсов и анализа их направленности.
- Создание на базе комбинированного приемника автоматизированного измерительного комплекса, позволяющего выполнять анализ параметров геоакустического сигнала и определять направление его прихода.
- 3. Проведение регулярных наблюдений, анализ полученных данных.
- Исследование распределения интенсивности геоакустического излучения по направлениям в различные периоды сейсмической активности.

Научная новизна работы

В рамках выполненной работы разработан оригинальный метод автоматизированного обнаружения импульсов геоакустической эмиссии (на фоне шумов) и определения их пеленга.

Исследовано распределение потока геоакустических сигналов по направлениям в сейсмически спокойные периоды и на заключительной стадии подготовки землетрясений. По результатам анализа этого распределения в периоды деформационных возмущений произведена оценка ориентации оси наибольшего сжатия приповерхностных пород в районе места измерений.

Практическая ценность работы

Работа выполнена в соответствии с планами научных исследований ИКИР ДВО РАН, в рамках Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 16, проектов Президиума ДВО РАН №05-1-0-02-051, №06-І-П16-070.

Результаты исследования характеристик направленности геоакустической эмиссии и ее связи с деформационными процессами могут быть использованы в изучении тектонических процессов, для создания методов локации областей повышенных напряжений и оценки уровня сейсмической опасности, в системах предупреждения техногенных катастроф.

Оригинальность программных продуктов подтверждена свидетельствами об отраслевой регистрации разработки № 9537 от 27.11.2007 и № 9766 от 10.01.2008.

Апробация работы

Результаты по теме диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- ІІІ международной конференции "Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений» в 2004 г., с.Паратунка, Камчатский край;
- международных конференциях по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2005, SCM'2006 и SCM'2007) в 2005 - 2007 гг., г. Санкт-Петербург;
- ежегодных научно-технических конференциях профессорскопреподавательского состава и аспирантов КамчатГТУ в 2006, 2007 гг., г.Петропавловск-Камчатский;
- ежегодной научной конференции МГУ «Ломоносовские чтения 2007» в 2007 г., г. Москва;
- международной конференции XXIV General Assembly Of The International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG'2007), Perugia, Italia в 2007 г. (два доклада);
- IV международной конференции «Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений» в 2007 г., с. Паратунка, Камчатский край;
- III всероссийской научной конференции «Проектирование инженерных и научных приложений в среде Matlab» в 2007 г., г. Санкт-Петербург;
- XX сессии Российского акустического общества в 2008 г., г. Москва;
- VI Всероссийском симпозиуме «Физика геосфер» в 2009 г., г.Владивосток.

Личный вклад

Автор работы провел анализ характеристик геоакустических сигналов, полученных с помощью комбинированного приемника, предложил классификацию и математическое описание сигналов, разработал метод автоматизированного обнаружения и анализа направленности геоакустических импульсов. Он участвовал в проектировании аппаратурной части системы регистрации и самостоятельно разработал программное обеспечение для ее функционирования. Им проведены комплексные регулярные наблюдения, осуществлялись сбор и обработка полученных данных, выполнен статистический анализ направленных свойств сигналов геоакустической эмиссии и исследованы их особенности.

Структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. В работе содержится 97 листов машинописного текста, 49 рисунков, одна таблица. Список литературы содержит 45 наименований.

Основные положения, выносимые на защиту

- 1. Метод автоматизированного обнаружения геоакустических импульсов, основанный на анализе структуры регистрируемого сигнала.
- Результаты статистических исследований распределения интенсивности геоакустического излучения по направлениям в сейсмически спокойные периоды и на заключительной стадии подготовки землетрясений в период 2004 – 2009 гг.
- Наличие ярко выраженной анизотропии в распределении интенсивности геоакустического излучения по направлениям в суточном интервале перед землетрясениями.
- Оценка ориентации оси наибольшего сжатия приповерхностных пород по результатам анализа направленности геоакустической эмиссии перед землетрясениями.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение

Определены актуальность темы исследований, цель и новизна работы, практическая ценность, личный вклад автора.

Сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава «Исследование геоакустической эмиссии векторно-фазовыми методами»

В разделе 1.1. «Особенности геоакустической эмиссии» на основе анализа публикаций, посвященных исследованию геоакустической эмиссии, показано, что увеличение интенсивности эмиссии в осадочных породах является следствием роста деформационных процессов. Поскольку прочность пород по отношению к касательным напряжениям меньше, чем к сжатию, то в области излучения геоакустической эмиссии преобладают сдвиговые источники акустического сигнала. Их ориентация обусловлена направлением максимальных касательных напряжений, ориентированных преимущественно под углом 45° к оси наибольшего сжатия. При этом максимимы продольных акустических колебаний приходятся на направления, перпендикулярные этой оси для волны сжатия и совпадающие с ней для волны разряжения (рис. 1,a). Как правило, волна сжатия по интенсивности больше волны разряжения, что связано с особенностями процессов разрушения и диссипации энергии. Диаграмма направленности поперечных колебаний повернута на 45° относительно диаграммы направленности продольных волн (рис. $1, \delta$). Установка приемника в воде, где поперечные колебания сильно затухают, существенно облегчает задачу исследо



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

вания направленности эмиссии, так как позволяет ограничиться исследованием только продольных волн.

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 (потока импульсов) по

направлениям в точке приема будет соответствовать примеру, приведенному на рис.2,*а*.

Увеличение напряжений, например, при подготовке землетрясений, приведет к появлению в зоне геоакустической эмиссии достаточно большого числа одинаково ориентированных сдвиговых источников (рис. $2, \delta$). 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 потока геоакустических импульсов по направлениям в точке приема может приобрести значительную асимметрию.



Рис. 2. Примеры диаграмм распределения интенсивности геоакустического излучения по направлениям в точке приема при отсутствии деформационных возмущений (*a*), 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.

Таким образом, анализ азимутального распределения усредненной амплитуды 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 раздельно и, соответственно, сливаются в шумовой сигнал. Если первая и вторая составляющие шума достаточно постоянны, хотя естественно тепловые шумы меняются в зависимости от сезона и это необходимо учитывать, 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.

В разделе 1.2. «Выбор средств регистрации геоакустической эмиссии» обоснован выбор комбинированного приемника производства ЗАО «Геоакустика» при ФГУП ВНИИФТРИ для изучения направленности геоакустического сигнала. Данный прибор позволяет одновременно регистрировать звуковое давление и три вза-имно ортогональные компоненты его градиента. Датчик рассчитан на работу в частотном диапазоне от 5 до 11000 Гц, чувствительность с учетом предварительных усилителей всенаправленного канала давления ~500 мВ Па⁻¹, чувствительность векторных каналов увеличивается на 6 дБ на октаву и составляет ~20 мВ Па⁻¹ на частоте 10 кГц. Кратко рассмотрены векторно-фазовые методы определения направления прихода акустических волн.

В разделе 1.3. «Особенности применения комбинированного приемника для регистрации геоакустической эмиссии» приведена схема и условия проведения эксперимента по изучению направленных свойств геоакустического сигнала в различные периоды времени (рис. 3). Определены масштабы зоны генерации геоакустического сигнала, оценены размеры источников эмиссии. Расчеты показали, что длина регистрируемых источников колеблется в пределах 0.05–1.5 м, а их максимальное удаление – порядка 30 м. Максимальный угол $\mathcal{G}_{\kappa p}$ между осью приемника и направлением на источник, при котором все еще возможна регистрация сигнала, определяется из уравнения пассивной гидролокации и равен 84° (рис. 3). В связи со

сложностью обработки более зашумленного поверхностью озера вертикального канала, в данной работе рассматривается направленность геоакустической эмиссии только в горизонтальной плоскости. В дальнейшем, после разработки методов выделения полезного сигнала, информация с вертикального канала также будет использоваться.



Рис. 3. Схема проведения эксперимента по изучению направленных свойств геоакустического сигнала. Приведено вертикальное сечение контролируемого объема пород через точку установки приемника. Штриховкой отмечены области генерации, из которых может осуществляться прием геоакустического сигнала.

Раздел 1.4. «Анализ геоакустического сигнала» посвящен описанию геоакустического импульса. Его форма состоит из двух частей: резкое увеличение интенсивности (фронт) и достаточно продолжительная область затухания (рис. 4,*a*). Фронт и начальный фрагмент спада геоакустического сигнала, с еще достаточно большой амплитудой, превышающей фон до 30 раз, формируют основную часть импульса, несущую важную информацию о направлении на его источник. Остальная часть периода спада в значительной степени формируется реверберацией.



Рис. 4. Амплитудно-временная форма геоакустического импульса и фазовый портрет градиента давления на различных временных участках 1, 2, 3 (*a*). Параметры эллипса, описывающего область концентрации отсчетов геоакустического импульса, отображенных в полярных координатах (*б*). $\nabla P_{x}, \nabla P_{y}$ – проекции градиента давления на ось X и Y, соответственно.

Исследование отдельных импульсов в полярных координатах показывает, что большинство из них имеют явную направленность (рис. 4, δ). Это выражается в группировке отсчетов импульса в ограниченной области, форму которой удобно рассматривать в виде описывающего эллипса. Направление на источник сигнала совпадает с направлением большой полуоси эллипса, а амплитуда импульса, соответственно, равна ее длине \overline{R}_{s} . Это предположение будет справедливым, если считать, что зарегистрированные импульсы представляют *P*-волну, поскольку *S*-волны, как было указано ранее, при переходе в водную среду сильно затухают и в регистрируемых сигналах могут соответствовать лишь сигналам с очень малой амплитудой. Для устранения разночтений будем называть линию, проходящую через центр координат по большой полуоси описывающего эллипса, осью импульса. Направление на источник импульса лежит на данной оси, но вследствие симметрии диаграммы направленности приемников градиента давления, требуется дополнительный анализ с учетом канала давления для устранения неоднозначности пеленгования.

Наличие малой полуоси \overline{R} описывающего эллипса обусловлено преимущественно помехами и слабой эллиптичностью движения частиц среды в волне сигнала геоакустической эмиссии. На начальном участке (в отсутствие реверберации) величина эллиптичности зависит от ориентации и размеров источника, а также расстояния от приемника до места входа геоакустического сигнала в воду. На последующих участках импульса наиболее существенный вклад в формирование характера движения частиц среды в волне вносит реверберация и наличие шумового фона водоема, приводящего к неустойчивости формы эллипса движения частиц в среде, тем большей, чем меньше соотношение *сигнал/шум*.

В разделе 1.5. «Математическое описание геоакустического импульса» представлено математическое описание геоакустических импульсов, состоящее из двух частей: описание огибающей импульсов и описание их формы в полярных координатах.

Анализ амплитудно-временных характеристик импульса позволяет разложить его огибающую на две экспоненциальные функции: фронта и спада, а сам сигнал эмиссии можно описать выражением:

$$F(t) = A(t)S(t).$$
⁽¹⁾

Здесь S(t) – произвольный широкополосный сигнал,

$$A(t) = \begin{cases} 8 \cdot 10^{-3} e^{1700t}, & t \le 9 \cdot 10^{-4} \\ e^{-965t}, & t > 9 \cdot 10^{-4} \end{cases}$$
 – огибающая сигнала.

Значения степенных коэффициентов экспоненциальных функций получены экспериментальным путем при усреднении параметров порядка 1000 импульсов.

Представить импульс в полярных координатах можно в виде описывающего эллипса, ограничивающего пространство, заполненное отсчетами, распределенными по некоторому закону. Без учета поворота форма описывающего эллипса хорошо описывается уравнением:

$$x^2 / R^2_{\delta} + y^2 / R^2_{M} = 1,$$

где R_{δ}, R_{M} – соответственно большая и малая полуось описывающего эллипса.

Переписав данное уравнение из канонического в параметрический вид и добавив в него азимут источника *ф* получим полное уравнение описывающего эллипса:

$$\begin{cases} x = R_{\delta} \cos(\alpha) \cos(\varphi) + R_{M} \sin(\alpha) \sin(\varphi) \\ y = -R_{\delta} \cos(\alpha) \sin(\varphi) + R_{M} \sin(\alpha) \cos(\varphi) \end{cases}$$
(2)

где *x*, *y* – взаимно ортогональные направления, α – вспомогательный параметр, изменяющийся в диапазоне [0, 2π].

Во второй главе «Особенности системы регистрации геоакустических сигналов» рассматриваются принципы построения аппаратной части и программного обеспечения измерительного комплекса.

В разделе 2.1 «Автоматизированный метод выявления и анализа направленности геоакустического сигнала» описывается разработанный метод автоматизированного обнаружения и анализа направленности сигнала геоакустической эмиссии, основанный на математическом описании импульса, предложенном в гл.1.

При переходе из грунта в воду некоторые специфические характеристики геоакустического сигнала, безусловно, теряются, но возможность определения направления прихода акустической энергии в горизонтальной плоскости сохраняется. Основная проблема заключается в том, что анализ информации возможен лишь в течение очень короткого промежутка времени. Как было указано ранее, характерный сигнал, регистрируемый в воде комбинированным приемником, представляет собой череду достаточно коротких по времени ударных импульсов, различающихся по амплитуде. Учитывая наличие реверберации, информативной, с точки зрения определения направления прихода энергии, оказывается лишь начальная часть этих импульсов, обычно не превышающая 1-2 периодов. Поэтому применяемые в гидроакустике методы пеленгования с использованием БПФ и последующим временным усреднением, оказываются малоэффективными.

Кроме того, помимо геоакустических сигналов, обусловленных деформационными возмущениями, регистрируются разнообразные сигналы, вызванные метеорологическими, техногенными, антропогенными и другими факторами. Поэтому возникла необходимость в разработке метода анализа, позволяющего автоматически выделять сигналы только геоакустической природы и определять пеленг на их источник. Автоматизация является необходимым условием проведения экспериментов по изучению характеристик сигналов высокочастотной геоакустической эмиссии, поскольку они требуют обработки огромного потока экспериментальных данных.

Принципиально, разработанный метод включает два основных этапа обработки, выполняющихся по очереди в одном окне данных, размером 200 мс. После успешного выполнения этих этапов производится устранение неоднозначности направления прихода энергии сигнала и итоговая запись этого направления. Затем окно перемещается на 200 мс в случае успешного прохождения обоих этапов или 1/5 размера окна в остальных случаях.

На первом этапе метода определяется соответствие сигнала определенным амплитудно-временным критериям. Для этого задаются два порога, соответствующих возможным максимальному и минимальному значениям сигнала. Минимальное значение необходимо для обнаружения всплеска сигнала над уровнем фона. Максимальный порог соответствует уровню выхода сигнала за пределы динамического диапазона аппаратурного комплекса. Численные значения порогов определяются опытным путем, в соответствии с уровнем шумов на конкретном измерительном пункте.

На втором этапе производится анализ формы импульса в полярных координатах, суть которого заключается в выполнении двух операций: определение направления на источник сигнала и анализ эллиптичности (или эксцентриситета) описывающего эллипса. Как было указано ранее, специфические особенности регистрируемого сигнала не позволяют применять простые методы определения направления прихода импульса. Поэтому был разработан более сложный метод, позволяющий достаточно точно определять пеленг сигналов в данных условиях.

Для этого по максимально удаленной от центра координат точке D определяется примерный угол поворота основной оси импульса $\bar{\theta}$ и перпендикуляры к нему $\beta_1 = \bar{\theta} + 90^\circ$ и $\beta_2 = \bar{\theta} - 90^\circ$ (рис. 5). Последние необходимы для определения значения радиуса \bar{R} окружности, вписанной в эллипс:

$$R = 1/2(r(\beta_1) + r(\beta_2)), \tag{4}$$

где $r(\beta)$ – среднее удаление точек, расположенных в секторах [β - $\Delta \varphi$, β + $\Delta \varphi$] от центра координат, $\Delta \varphi$ – интервал усреднения.



Рис. 5. Определение направления на источник сигнала. ∇P_x , ∇P_y – проекции градиента давления на ось X и Y, соответственно.

Предполагается, что все точки с радиусами меньшими \overline{R} не должны учитываются на следующих этапах обработки метода. Так исключается влияние помех, обусловленных метеорологическими факторами. Кроме того, нивелируется сигнал электромагнитных помех, действующих на аналоговую часть тракта регистрации, которые приближают усредненное направление отсчетов к азимуту 45°.

Далее происходит определение радиусвектора центра масс \vec{M} отсчетов удовлетворяющих условию $|\vec{r}| \ge \vec{R}$:

$$\vec{M} = \sum_{i} m_i \vec{r}_i / \sum_{i} m_i , \qquad (5)$$

где \vec{r}_i – радиус-вектор *i*-го отсчета в окне дан-

ных, $m_i = |\vec{r_i}| / \overline{R}$ его весовой коэффициент. Если угол между радиус-вектором $\vec{r_i}$ и направлением $\overline{\theta}$ больше 90°, то он заменяется на противоположный. Истинная ось импульса совпадает с найденным радиус-вектором центра масс \vec{M} .

После определения оси импульса производится проверка его формы в полярных координатах. Для этого заново, но уже с учетом определенного выше направления оси, вычисляются значения большой \overline{R}_{5} и малой \overline{R} полуосей эллипса. После этого, по уточненным значениям полуосей, вычисляется эллиптичность описывающего эллипса. На основании проведенных статистических исследований, пороговое значение эллиптичности выбрано равным 0.25. Если полученное значение превышает пороговый уровень, то считается, что форма импульса существенно искажена, и он не подлежит дальнейшей обработке.

На последнем этапе обработки, после успешного обнаружения импульса, производится устранение неоднозначности, вызванной симметрией диаграмм направленности векторных каналов комбинированного приемника.

При рассмотрении результатов использовались понятия активности геоакустической эмиссии $\Omega(t)$ и ее азимутального распределения $D(\alpha, t)$. Первая из этих величин представляет собой зависящую от времени частоту следования импульсов в определенном интервале амплитуд dA, а вторая – распределение регистрируемого потока импульсов по направлениям. Для большей наглядности данная гистограмма отображается графически в полярных координатах, где расстояние от центра координат до точки пространства с углом α равняется значению $D(\alpha,t)$. Для построения гистограммы $D(\alpha,t)$ распределения потока импульсов по направлениям применяется интервал группировки углов равный 5°.

После разработки данный метод успешно прошел апробацию на синтезированном и реальном сигнале. Погрешность измерения направления составила 0.4°.

В разделе 2.2. «Общее описание комплекса» представлена структура спроектированного измерительного аппаратно-программного комплекса (рис. 6), работающего в составе системы исследования геоакустической эмиссии ИКИР.



Рис. 6. Система исследования геоакустической эмиссии на озере Микижа ИКИР ДВО РАН. Звездочками обозначены элементы измерительного аппаратно-программного комплекса изучения направленности геоакустического сигнала; КП – комбинированный приемник.

Разработанный комплекс состоит из двух разнесенных узлов: узел регистрации, расположенный непосредственно около места установки акустических приемников, работающий в автономном режиме, и узел обработки зарегистрированных сигналов, расположенный в лаборатории ИКИР. Узлы объединены между собой системой телеметрии, позволяющей удаленно осуществлять непрерывный контроль состояния геоакустической эмиссии на месте регистрации сигнала.

Кроме этого приведены некоторые особенности оцифровки, хранения, каталогизации и обработки данных.

Система регистрации (рис. 7), описанная в разделе 2.3. «Система регистрации», расположенная на измерительном пункте ИКИР озере Микижа, осуществляет оцифровку и каталогизацию акустического сигнала, регистрируемого вблизи дна водоема на глубине примерно 4 м. Кроме того, она производит вычисление и отображение

усредненного акустического сигнала, позволяющего оперативно контролировать интенсивность. его Запись оцифрованного сигнала производится в файлы формата WAV, каждый из которых маркируется с помощью стандартных информационных полей (тегов) информацией о месте и точном времени его регистрации.



Рис. 7. Структурная схема программы регистрации.

В качестве устройства оцифров-

ки используются установленные в персональный компьютер звуковые карты профессионального класса, выбор которых обусловлен рядом преимуществ перед АЦП соизмеримой ценовой категории, к которым можно отнести более низкую цену, лучшие технические характеристики (частота дискретизации, разрядность) и лучшую взаимозаменяемость. Недостатком звуковых карт является ограничение числа каналов записи. Вследствие этого для организации регистрации данных необходимо использовать несколько звуковых карт, что требует решения проблем их одновременного старта и синхронной работы.

Для организации и управления процессом оцифровки и записи цифровых данных на диск разработано специальное программное обеспечение «Sound Processor» (свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 9537 от 27.11.2007). Данная программа разработана на языке программирования С⁺⁺ в среде разработки Microsoft Visual Studio с использованием методов объектно-ориентированного программирования, выбор которых, основан на анализе задач, решаемых программой.

Разработанный метод автоматизированного обнаружения и оценки направленности геоакустического сигнала реализован в специальном программном обеспечении «SmartPeleng» (свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 9766 от 10.01.2008 г.), функционирующем в лабораторных условиях (рис. 8). Его описание дано в разделе 2.4. «Система обработки». Программный продукт написан на языке программирования С⁺⁺, среда разработки – Microsoft Visual Studio. Вследствие отсутствия необходимости повторного использования написанного кода, в данной программе решено отказаться от использования объектно-ориентированного программирования в пользу модульной структуры.

Архитектура программы построена в соответствии с шаблоном проектирования «Модель-представление-контроллер» (англ. Model-view-controller, MVC), которая отличается тем, что программа разделена на три отдельных компонента:

- модель предоставляет данные (обычно для представления), а также реагирует на запросы (обычно от контроллера), изменяя свое состояние,
- представление отвечает за отображение информации (пользовательский интерфейс),
- контроллер интерпретирует данные, введенные пользователем, и информирует модель и представление о необходимости соответствующей реакции.

Важно отметить, что как представление, так и контроллер зависят от модели. Однако модель не зависит ни от представления, ни от контроллера. Это одно из ключевых достоинств подобного разделения, которое позволяет строить модель независимо от визуального представления, а также создавать несколько различных представлений для одной модели. Это свойство использовалось для реализации в

программе двух представлений – графического интерфейса пользователя и блока обработки (рис. 8).

Совокупность конфигураторов, включенных в интерфейс пользователя, и их настроек позволяет организовать три режима обработки данных:

- Ручная обработка данных. Данный режим позволяет пользователю детально изучать сигнал. Ни одна автоматизированная функция не задействуются.
- Автоматизированная обработка одного пакета файлов. Данный режим позволяет пользовате-





лю выбрать вручную файлы, подлежащие обработке. При этом файлы могут иметь произвольные названия.

 Пакетная обработка. В данном режиме программа обрабатывает все файлы, найденные в указанной директории. Файлы выбираются и сортируются по заданным маскам.

В третьей главе «Результаты исследования геоакустической эмиссии» производится анализ данных, полученных с помощью разработанного автоматизированного аппаратно-программного комплекса. В разделе 3.1. «Проверка работоспособности комплекса» описан эксперимент, проведенный сразу после установки комплекса на измерительном пункте, позволивший определить его работоспособность и поправку в – 8°, компенсирующую неточную ориентацию приемника по отношению к сторонам света.

Раздел 3.2. «Особенности регистрируемого геоакустического сигнала» содержит описание параметров геоакустических импульсов, регистрируемых в реальных условиях.

Разделы 3.3. «Анализ активности геоакустической эмиссии в сейсмически спокойные периоды» и **3.4.** «Анализ активности геоакустической эмиссии в периоды возмущений» посвящены анализу распределения потока геоакустических импульсов по направлениям.

Пример сейсмически спокойного (фонового) периода, зарегистрированного 15.11.2004 в условиях отсутствия деформационных и атмосферных возмущений, приведен на рис. 9,*a*. Среднее значение активности геоакустической эмиссии этого периода составляет 0.19 имп./с. Из иллюстрации видно, что в целом азимутальное распределение геоакустической эмиссии достаточно равномерно. Но с направлений от -20° до 60° и от 210° до 240° наблюдается примерно двукратное повышение ее уровня.

Для сравнения в том же масштабе приведены фоновые периоды зимы 2007-2008 гг. и весны-лета 2008 года (рис. 9,*б-в*). Активность геоакустической эмиссии первого периода определялась с ноября 2007 г. по февраль 2008 г. и в среднем составляет 0.63 имп./с. Второй период регистрировался с мая по июнь 2008 г., среднее значение его активности равно 0.14 имп./с.



Рис. 9. Азимутальное распределение активности геоакустической эмиссии D(α) (имп./град. c), соответствующее фоновому периоду весны 2004 г. (а), зимы 2007-2008 гг. (б) и весны-лета 2008 г (в).

Анализ приведенных графиков позволяет сделать некоторые заключения. Вопервых, в фоновые периоды источники акустической эмиссии рассредоточены в некоторой степени равномерно во всем контролируемом объеме. Во-вторых, наблюдается определенная изменчивость направленности активности геоакустической эмиссии длительного характера, что видно из сравнения ее формы в 2004 г. и в 2008 г. При этом две диаграммы 2008 года имеют и некоторые сходства, в частности, в обоих случаях в направлениях около 60°, 125° и 310° заметны локальные максимумы активности. При этом по множеству нерегулярно расположенных лепестков диаграмм направленности эмиссии можно судить о сложном характере напряжений, а по асимметрии расположения максимумов излучения можно сделать вывод о неоднородности свойств среды вокруг точки наблюдений.

Непрерывные наблюдения, проведенные в период с августа 2007 г. по декабрь 2009 г. позволили построить график сезонных изменений активности геоакустической эмиссии $\Omega(t)$ (рис. 10) с усреднением в суточном временном интервале. Как видно, ее поведение хорошо аппроксимируется синусоидой, максимумы которой приходится на осень, а минимумы – на весну. Можно отметить сезонные и годовые

вариации активности, а также заметную повторяемость ее локальных максимумов, что, видимо, определяется метеорологическими факторами.

В отличие от фона, периоды возмущений характеризуются заметным повышением уровня геоакустической эмиссии под действием деформационных возмущений,

которые достаточно часто наблюдаются в преддверии сейсмических событий. Вследствие сложности однозначного причисления какого-либо периода к фоновому или активному типу, ограничимся рассмотрением только ярко выраженных возмущений, зарегистрированных в течение суток до землетрясений. Параметры рассмотренных геоакустических возмущений и соответствующих сейсмических событий приведены в Таблице.

Рассмотрим диаграмму распределения интенсивности геоакустического излучения по направлениям данного возмуще-



Рис. 10. Сезонные изменения геоакустической активности Ω(t) (сплошная линия) и график синусоиды для сравнения (пунктирная линия).

ния в сравнении с фоном того же периода (рис. 11, рис. 9). Из 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.

Таблица

Период, в течение которого наблюдалось	Информация о землетрясении (по данным КФ ГС РАН)			
возмущение геоакустической эмиссии,	Лата и рремя. ЦТ	Энергетический	Азимут,	Расстояние,
UT	дата и время, ОТ	класс	градус	KM.
10.11.2004 с 02:00 до 12:00	10.11.2004 21:47	9.1	110	14.7
14.12.2007 с 03:00 до 10:00	15.12.2007 09:00	11.6	110	175
14.05.2008 с 00:00 до 08:00	15.05.2008 05:49	11.1	100	127
14.08.2008 с 09:00 до 23:00	15.08.2008 06:03	9.1	157	89
с 18.11.2008 12:00 до 19.11.2008 12:00	19.11.2008 08:25	11.6	87	119

Изучая приведенные диаграммы, можно выделить определенные сходства между ними. В возмущениях всех рассматриваемых периодов наблюдается максимум активности геоакустической эмиссии с направления примерно 30 градусов, вторичные же направления излучения, как правило, не имеют подобную повторяемость.

Все приведенные диаграммы азимутального распределения активности геоакустической эмиссии заметно отличаются от диаграммы идеального единичного сдвигового источника, имеющего характерную форму (рис. 1,*a*). Наблюдаются как искажения формы лепестков, так и варьирование их размеров. Так в большинстве случаев может отсутствовать от 1 до 3 лепестков, а размер одного превышает остальные. Это вызвано несколькими обстоятельствами. Во-первых, как описывалось ранее, генерируемые сдвиговым источником волны сжатия по интенсивности больше волн разряжения, вследствие чего акустический сигнал излучается преимущественно в направлениях перпендикулярных оси наибольшего сжатия.

Во-вторых, диаграмма направленности акустических сигналов таких генераторов даже в лабораторных условиях сильно искажена и значительно отличается от идеальной. В натурных же условиях, формирование лепестков идеальной формы практически невозможно. В-третьих, распределение источников неравномерно в осадочных породах, а точка регистрации в большинстве случаев не находится в центре области их регистрации. Поэтому диаграмма азимутального распределения активности геоакустической эмиссии не имеет симметрии.



Рис. 11. Азимутальное распределение активности геоакустической эмиссии 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.

Рассмотрим подробнее особенности формирования диаграммы распределения интенсивности геоакустического излучения по направлениям на примере случая, зарегистрированного 10.11.2004 (рис. 11,*a*) перед землетрясением, произошедшим в тот же день (см. таблицу). На приведенной иллюстрации хорошо заметно наличие двух основных зон излучения, расположенных по направлениям 25 ± 10 и 225 ± 25 градусов. Учитывая, что интенсивность волн разряжения сдвигового источника достаточно мала, считаем, что регистрируемый с указанных направлений сигнал пре-имущественно состоит из волн сжатия. Таким образом, ось наибольшего сжатия в породах, ориентированная перпендикулярно основным направлениям прихода акустического сигнала, наклонена под углом около 120 градусов.

Диаграммы распределения интенсивности геоакустического излучения по направлениям, приведенные на рис. 11,*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. Оценим ориентации осей наибольшего сжатия как направлений, перпендикулярных положению максимума акустического излучения перед пятнадцатью землетрясениями с энергетическим классом больше 10, произошедшими за период 2004 – 2009 гг. по азимутам 90 – 150 градусов на расстояниях до 250 км (рис. 12,*a*). Для этого, учитывая возможные искажения, восстановим каждую диаграмму в соответствии с рис.1 по одному доминирующему лепестку путем добавления остальных, расположив их по направлениям \pm 90 и 180 градусов от него (рис. 12,*б*). Полученные фигуры показывают, что ориентация диаграмм направленности геоакустической эмиссии в точке приема для всех возмущений лежит в определенном, хорошо отличимом диапазоне, несмотря на то, что доминирующие лепестки были расположены в разных квадрантах.

Анализ положений лепестков позволяет выделить два возможных направления ориентации осей наибольшего сжатия: 33 и 123 градуса. Такая неоднозначность связана с тем, что наиболее интенсивно сдвиговые источники генерируют акустические колебания в двух направлениях: в направлении оси сжатия и перпендикулярно ей. При этом большее число исследованных угловых диаграмм геоакустической эмиссии имеет максимум по оси 33 градуса, а среднее направление землетрясений, являющихся следствием накопления значительных напряжений около их очагов, равно 131 градусу. Учитывая это и то, что самое интенсивное излучение происходит в направлениях перпендикулярных оси сжатия, наиболее вероятной ориентацией оси наибольшего сжатия является направление с углом 123 градуса относительно севера.



Рис. 12. Угловые характеристики геоакустической эмиссии в точке наблюдения, зарегистрированные перед пятнадцатью землетрясениями, произошедшими в период 2004-2009 гг.: а) азимуты доминирующих направлений; б) восстановленные с учетом возможных искажений диаграммы максимумов геоакустического излучения по направлениям; в) гистограмма распределения углов поворота осей сжатия. На рисунках *а* и *б* азимуты зарегистрированных землетрясений показаны отрезками, исходящими от центра фигуры, максимальные направления геоакустического отклика показаны у границы окружности.

Полученный результат соответствует генеральному направлению действия тектонических напряжений у побережья южной Камчатки, которое в среднем равно 125 градусам. На рис. 12, в показана гистограмма распределения углов поворота осей сжатия. Анализ изменения азимутального распределения активности геоакустической эмиссии во времени показывает, что она может иметь несколько наиболее активных направлений излучения (рис. 13).



Рис. 13. Примеры временных диаграмм азимутального распределения активности геоакустической эмиссии D(a,t) перед землетрясениями: a) 15.08.2008; б) 19.11.2008. Стрелками отмечены направления от эпицентров землетрясений.

На рис.13, а показан пример двух одновременно наблюдаемых направлений, которые в данном случае являются, по всей видимости, взаимно ортогональными лепестками искаженной диаграммы сдвигового источника (рис.1). В отдельных случаях направления могут смещаться или проявляться попеременно (рис.13, б). Характер этих блужданий, по всей видимости, определяется источниками деформационных возмущений и неоднородностями среды вокруг точки наблюдений. Представляет интерес тот факт, что время, затрачиваемое на изменение числа и ориентации осей сжатия, сопровождающееся соответствующими изменениями диаграмм распределения интенсивности геоакустического излучения по направлениям, составляет в данном случае всего 15-30 мин.

В заключении сформулированы основные результаты работы и перечислены их возможные приложения.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Результатом работы, проведенной в рамках диссертации, можно считать следующее:

1. Разработан метод автоматизированного обнаружения геоакустических импульсов, основанный на определении структуры сигнала и реализованный в специально разработанной программе. На базе комбинированного приемника создан измерительный комплекс, реализующий функции высокоточного анализатора потока сигналов геоакустической эмиссии по направлениям.

2. За время исследования с 2004 по 2009 год получен представительный объем статистических данных о распределении интенсивности геоакустического излучения по направлениям. Детально рассмотрено свыше 20 случаев деформационных возмущений, предваряющих сейсмические события с энергетическим классом выше 10. Построен график многолетних сезонных изменений активности геоакустической эмиссии в сейсмически-спокойные периоды. Установлено, что минимумы активности приходятся на весну, максимумы – на осень. При этом активность геоакустической эмиссии варьирует от 0.1 до 1.2 импульсов в секунду.

3. Показано, что при росте уровня эмиссии в суточном интервале перед землетрясениями, возникают ярко выраженные максимумы в распределении интенсивности геоакустического излучения по направлениям, превышающие фоновые значения в десятки раз. Усредненная по направлениям активность геоакустической эмиссии в эти периоды превышает фоновую более чем в три раза.

4. По результатам анализа направленности геоакустической эмиссии перед пятнадцатью землетрясениями с энергетическим классом больше 10, произошедшими за период 2004 – 2009 гг. по азимутам 90 – 150 градусов на расстояниях до 250 км, произведена оценка ориентации оси наибольшего сжатия пород в пункте наблюдения. Установлено, что для всех случаев, диапазон ориентации оси колебался в интервале углов 105 – 140 градусов со средним значением в 123 градуса. Полученный результат совпал с генеральным направлением действия тектонических напряжений у побережья Южной Камчатки равным 125 градусам.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

По теме диссертации опубликовано 22 работы, из них 6 в рецензируемых журналах (5 из перечня ВАК), 1 монография, 2 свидетельства об отраслевой регистрации разработок, 13 публикаций в материалах научных мероприятий.

Публикации в рецензируемых журналах и монографии

- 1. Б. М. Шевцов, Ю. В Марапулец., **А. О. Щербина**. О направленности приповерхностной высокочастотной геоакустической эмиссии в периоды деформационных возмущений // ДАН. 2010. Т.430, №1. С. 119-122.
- 2. В. А. Гордиенко, Т. В. Гордиенко, Ю. В. Марапулец, А. О. Щербина. Изучение высокочастотной геоакустической эмиссии приемным модулем на базе векторного приемника // Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика. Астрономия. М. 2009. №4. С. 94-98.
- А. В. Купцов, Ю. В. Марапулец, М. А. Мищенко, О. П. Руленко, Б. М. Шевцов, А. О. Шербина. О связи высокочастотной акустической эмиссии приповерхностных пород с электрическим полем в приземном слое атмосферы // Вулканология и сейсмология. – 2007. – №5. – С.71-76.

- И. А. Ларионов, А. О. Щербина, М. А. Мищенко. Отклик геоакустической эмиссии на процесс подготовки землетрясений в разных пунктах наблюдений // Вестник. КРАУНЦ, серия науки о Земле. – г. Петропавловск-Камчатский. – 2005. – №2. – С. 108-115.
- 5. *А.О. Щербина*, *М. А. Мищенко, И. А. Ларионов*. Аппаратно-программный комплекс мониторинга геоакустической эмиссии // Вестник. КРАУНЦ, серия науки о Земле. г. Петропавловск-Камчатский. 2005. №2. С.128-132.
- 6. Ю. В. Марапулец, А. О. Щербина. Методы исследования пространственной анизотропии геоакустической эмиссии // Электронный журнал «Техническая акустика». – 2008.– № 14. – http://ejta.org.
- Ю. В. Марапулец, М. А. Мищенко, А. В. Шадрин, А. О. Щербина. Методы исследования высокочастотной геоакустической эмиссии: монография. – г. Петропавловск-Камчатский: КГТУ. – 2008. – 107 с.

Свидетельства об отраслевой регистрации разработок

- 8. *Щербина А. О.* Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 9537 от 27.11.2007 «Программа регистрации акустического сигнала Sound Processor v.1.1»
- 9. *Щербина А. О.* Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 9766 от 10.01.2008 «Программа для выделения геоакустических импульсов и вычисления их направлений SmartPeleng v0.7»

Публикации материалов научно-технических конференций

- 10. Ю. В. Марапулец, А. В. Купцов, А. О. Щербина, Г. Ю. Голотенко. Исследование возмущений геоакустической эмиссии в период подготовки землетрясений // Сборник докладов III международной конференции «Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений. – г. Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН. – 2004. – http://ikir.kamchatka.ru/ Russian/Science/2004/1-13.pdf.
- 11. Ю. В. Марапулец, А. О. Щербина. Аппаратно-программный комплекс для регистрации геоакустических возмущений // Рыбохозяйственное образование и научные исследования в Камчатском регионе. Материалы научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава и аспирантов КамчатГТУ. г. Петропавловск-Камчатский : КамчатГТУ. 2006. С. 153-155.
- 12. Ю. В. Марапулец, А. О. Щербина. Система автоматического поиска и определения направлений геоакустических сигналов на выходе векторно-фазового комбинированного приемника // Теория и практика научных исследований в рыбохозяственной отрасли Камчатки. Материалы ежегодной научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава КамчатГТУ. – г. Петропавловск-Камчатский : КамчатГТУ. – 2007. – Часть 1. – С. 129-131.
- 13. В. А. Гордиенко, Т. В. Гордиенко, А. В. Григорьев, А. В. Купцов, Ю. В. Марапулец, А. О. Щербина. Методы изучения высокочастотной геоакустической эмиссии комбинированным приемным модулем на базе векторного приемника // Тез. еже-

годной научной конференции МГУ «Ломоносовские чтения 2007». – Москва : МГУ. – 2007. – С.136.

- 14. Y. Marapulets, A. Kuptsov, I. Larionov, M. Mischenko, A. Sherbina, V. Gordienko. Anisotropy of high-frequency geoacoustic emission at different stages of seismic event preparation // XXIV General Assembly Of The International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG'2007). – 2-13 July 2007. – Perugia, Italia.
- 15. O. Rulenko, Y. Marapulets, M. Mischenko, A. Scherbina. Simultaneous disturbances of high-frequency geoacoustic emission and of electric field in the near-ground air // XXIV General Assembly Of The International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG'2007). – 2-13 Juy 2007. – Perugia, Italia.
- 16. В. А. Гордиенко, Т. В. Гордиенко, Ю. В. Марапулец, А. О. Щербина. Результаты исследования анизотропии геоакустических сигналов на озере Микижа векторно-фазовыми методами // Сборник докладов IV Международной конференции «Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений». – г. Петропавловск-Камчатский : ИКИР ДВО РАН. – 2007. – С. 140-146.
- 17. А. В. Купцов, И. А. Ларионов, Ю. В. Марапулец, А. О. Щербина. Геоакустическая система мониторинга и прогнозирования сейсмической активности на полуострове Камчатка // Сборник докл. Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2005). – СПб. – 2005. – Т.2. – С. 159-161.
- 18. А. В. Купцов, И. А. Ларионов, Ю. В. Марапулец, М. А. Мищенко, А. В. Шадрин, А. О. Шербина. Применение нейронных сетей для оценки возмущений геоакустической эмиссии на заключительной стадии подготовки землетрясений на Камчатке // Сборник докл. Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2006). СПб. 2006. Т.1. С. 238-240.
- 19. И. А. Ларионов, Ю. В. Марапулец, М. А. Мищенко, А. В. Шадрин, А. О. Щербина Нейронные сети на картах Кохонена в задачах оценки возмущений геоакустической эмиссии // Сборник докл. Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2007). – СПб. – 2007. – Т.1. – С.290-292.
- 20. И. А. Ларионов, Ю. В. Марапулец, М. А. Мищенко, А. О. Щербина, А. В. Шадрин. Система реального времени для обработки сигналов геоакустической эмиссии // Сб. докладов III Всероссийской научной конференции «Проектирование инженерных и научных приложений в среде Matlab». – СПб. – 2007. – С.1435-1442.
- 21. В. А. Гордиенко, Т. В. Гордиенко, Ю. В. Марапулец, А. О. Щербина. Высокочастотные оперативные предвестники землетрясений // Физические проблемы экологии (Экологическая физика): сб. научн. трудов. М. : МАКС Пресс. 2008. №15. С. 70-81.
- 22. Б. М. Шевцов, Ю. В. Марапулец, А. О. Щербина. Особенности анизотропии высокочастотной геоакустической эмиссии на Камчатском полигоне // Физика геосфер: материалы докл. VI Всеросс. симпоз. – г. Владивосток. –2009. – С. 149-154.

Щербина Альберт Олегович

ИЗМЕНЕНИЕ НАПРАВЛЕННОСТИ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ГЕОАКУСТИЧЕ-СКОЙ ЭМИССИИ В ПЕРИОДЫ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

Отпечатано в типографии ООО «ФОН»

Подписано к печати: 26.05.2010 г. Формат 60х84/16 Усл. печ. л. 1,4 Тираж 100 экз. Заказ 1513-Б