

СЕКЦИЯ 4. РАДИОФИЗИКА И АКУСТИКА ЭНЕРГОАКТИВНЫХ ЗОН

ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНЫХ ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ-ДЕФОРМОГРАФОВ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В АКУСТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

APPLICATION OF LASER INTERFEROMETERS-STRAINMETERS FOR REGISTRATION OF GEOPHYSICAL PROCESSES IN THE ACOUSTIC FREQUENCY RANGE

Д.В.Александров¹, М.Н. Дубров.¹, И.А.Ларионов²

¹ ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

² ИКИР ДВО РАН

Currently, laser interferometer measurement systems are the most accurate means employed for the registration of geodynamic, seismic and other geophysical deformation processes. In this report we describe the application of laser interferometers-strainmeters for registration of geophysical processes in the acoustic range of frequencies. Mobile and portable laser interferometers-strainmeters are used for measurements. In these devices we apply three-mirror interferometer, which simplifies the installation and configuration in the field observation. The registration system of heterodyne type, which is resistant to the turbulent distortions of the wave beam and which allows to measure in the open atmosphere, is used for a signal recording in the frequency range 10(-5)-10(3) Hz. The comparison of data, obtained from strainmeters and acoustic sensors installed in the energy active zone, is performed. Observations were carried out on the IRE underground beam waveguide (Moscow region), on the POI and IKIR FEB RAS Stations (Far East and Kamchatka region). Research and development aimed at creating technology for early detection of dangerous geodynamic processes- earthquakes, landslides, tsunami waves. The produced version of laser strainmeters can be effective in solving various problems: geological, geophysical and environmental services, construction, engineering infrastructure, etc. With their help, estimates of background processes in natural conditions may be obtained, including industrial and construction facilities, and underground mine workings, researching expeditions and field observation points.

Введение.

Лазерные интерферометры-деформографы широко используются в разных уголках планеты для изучения геофизических процессов [1-3]. Уникально широкая полоса частот лазерных интерферометрических измерителей деформации позволяет использовать эти инструменты при наблюдениях большого класса геофизических процессов происходящих в энергоактивных зонах. Среди таких процессов акустические явления представляют особый интерес для исследования и разработки технологии обнаружения опасных геофизических явлений. В данной работе рассматривается применение лазерных интерферометров-деформографов для регистрации колебаний земной поверхности в сейсмическом и акустическом диапазонах частот. Выполняется сопоставление результатов получаемых данных с деформографа и других датчиков, установленных в энергоактивной зоне. Наблюдения проводились на подземной лучевой линии ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН во Фрязино Московской области, на МЭС ТОИ ДВО РАН «мыс Шульца» и в ИКИР ДВО РАН п. Паратунка Камчатского края.

Исследования и разработки направлены на создание технологии раннего обнаружения опасных геодинамических процессов – землетрясений, обвально-оползневых явлений, волн цунами.

Описание используемых приборов и условия проведения экспериментов.

Для измерений используются мобильный и портативный лазерные интерферометры-деформографы [4]. В этих приборах применяется схема трехзеркального интерферометра, что упрощает установку и настройку в местах проведения наблюдений. Оптическая схема трехзеркального лазерного интерферометра-деформографа рассматривалась в работе [5].

Блок схема прибора представлена на рис.1. Деформограф работает следующим образом. Излучение лазера через светоделительную пластинку и электрооптический модулятор направляется в измерительное плечо. Часть излучения лазера, отражаясь от светоделительной пластинки, поступает на фотоприемник, где выделяется электрический интерференционный сигнал. Используемая система регистрации гетеродинного типа обладает устойчивостью к

турбулентным искажениям волнового пучка, что позволяет проводить измерения в открытой атмосфере. Исследуются микросейсмические и акустические возмущения в диапазоне частот от 0,00005 Гц до 1000 Гц. Предельное инструментальное разрешение реализованного устройства регистрации составляет 0,1 нм.

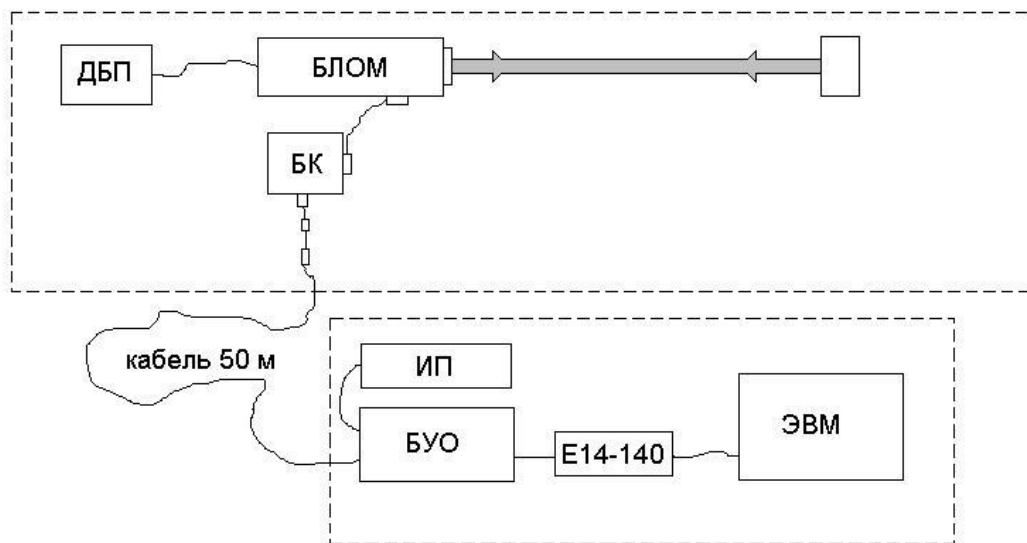


Рис 1. Блок схема интерферометра-деформографа.

Конструктивно трехзеркальный лазерный интерферометр-деформограф состоит из блока лазера и оптического модулятора (БЛОМ), блока контроля (БК) и блока управления интерферометром (БУИ), соединенного с блоками БК и БЛОМ электрическим кабелем длиной 50 м. Дополнительный блок питания (БП) предназначен для стабилизации работы лазерного излучателя в процессе постепенной выработки его ресурса.

Прибор устанавливался в лабораторном помещении (п. Паратунка, ИКИР ДВО РАН). Запись производилась в ночное время для уменьшения влияния воздействий связанных с производственным процессом. Длина базы составляла 12 метров.

Результаты испытаний и измерений.

На рисунке 2 показан спектр сигнала при искусственном возмущении с частотой 220 Гц. В качестве источника излучения применялась акустическая колонка от персонального компьютера, излучающая механические колебания в акустическом диапазоне частот. Присутствующая интенсивная компонента на частоте 100 Гц может быть связана с аппаратурной сетевой помехой, проникающей в канал регистрации. Программа спектральной обработки данных позволит осуществлять фильтрацию данной помехи [6].

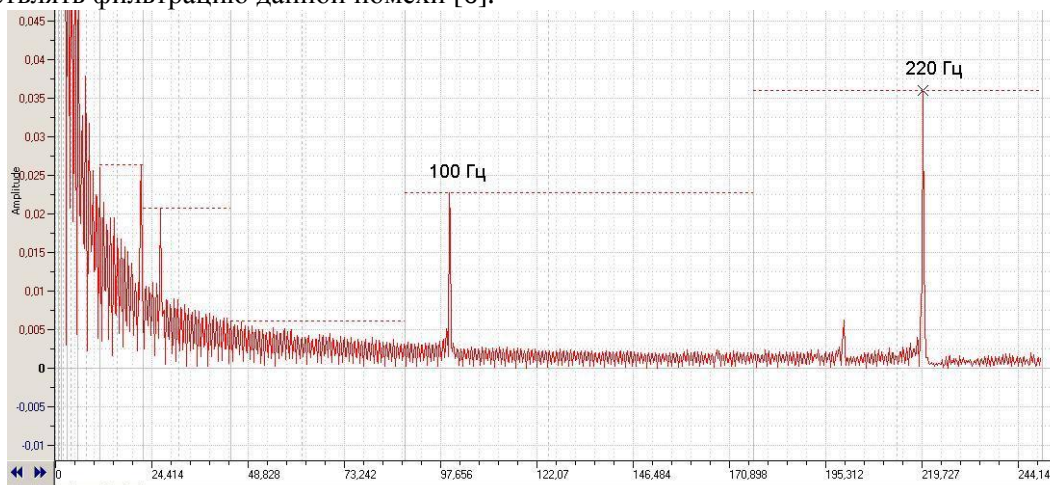


Рис. 2 Спектр сигнала при искусственном возмущении с частотой 220 Гц.

Характерный пример записей трехзеркального интерферометра-деформографа показаны на рис. 3. На этом рисунке наблюдается сейсмическое возмущение амплитудой 2 мкм с постепенным затуханием. В это время геофизической службой было зафиксировано землетрясение с магнитудой 4.3 в трехстах километрах от места наблюдения. (21.09.2009 14h 15m 36.4s, 53.13 N 162.71 E, $h=19$ km, $m=4.3$, у восточного побережья Камчатки, ГС РАН сейсмологический каталог сентябрь 2009 г.)

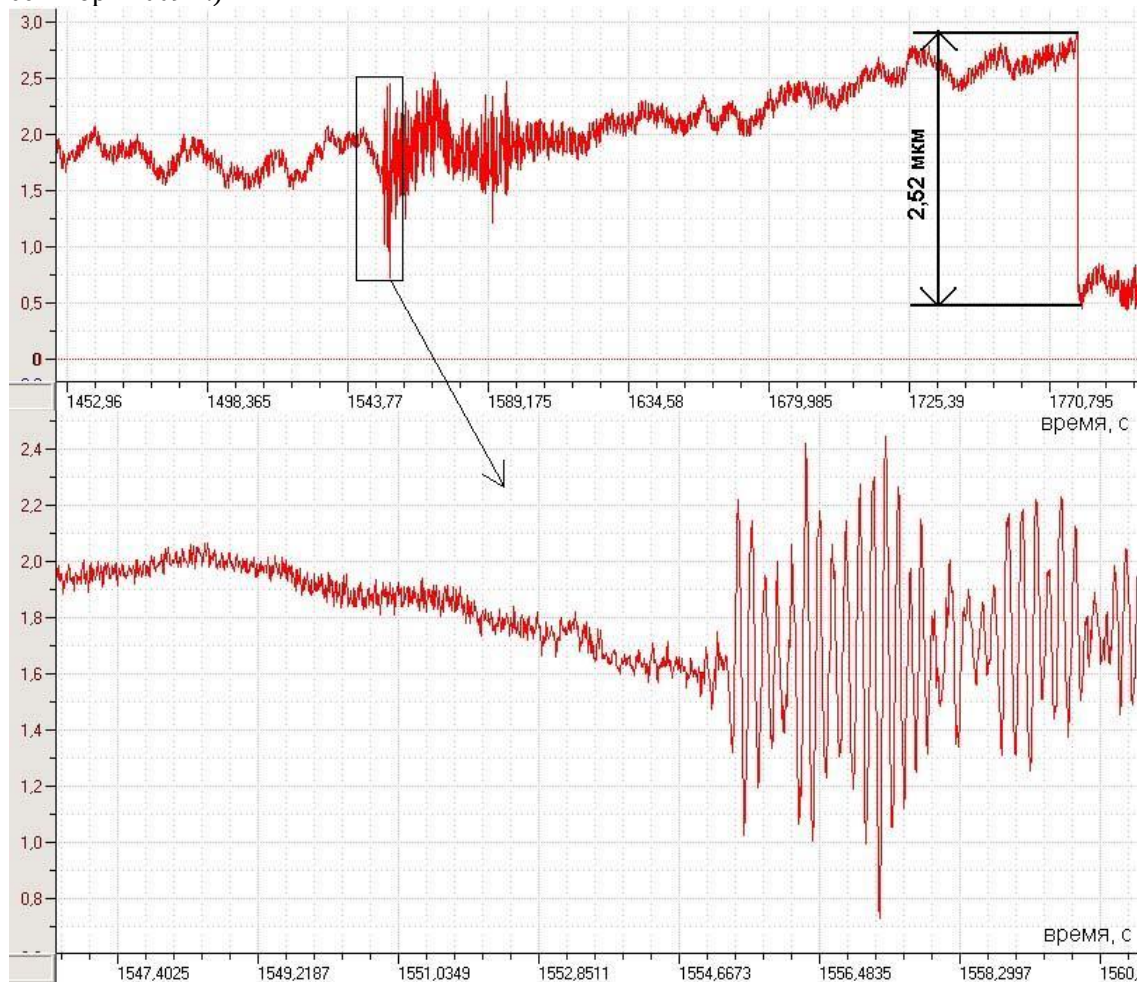


Рис. 3 Пример записи геофизического сигнала.

Закключение.

Проведены исследования и комплексные испытания экспериментальных макетов трехзеркального лазерного деформографа.

По совместной программе выполнены натурные наблюдения геофизических процессов в п. Паратунка Камчатского края ИКИР ДВО РАН.

Получены цифровые записи сейсмических волн от деформационных процессов.

Рассмотренный лазерно-интерферометрический прибор может быть использован для измерения геофизических процессов в акустическом диапазоне частот.

Создаваемые варианты лазерных деформографов могут быть эффективными при решении различных задач: геологические, геофизические и экологические службы, строительство, инженерная инфраструктура, и др. С их помощью также могут проводиться оценки фоновых процессов в натурных условиях, включая промышленные и строительные объекты, подземные и горные выработки, изыскательные экспедиции и полевые пункты наблюдения.

Литература

1. Shuzo Takemotoa, Hideo Momosea, Akito Arayab, Wataru Moriic, Junpei Akamatsuc, Masatake Ohashid, Akiteru Takamorib, Shinji Miyokid, Takashi Uchiyamad, Daisuke Tatsumie, Toshihiro Higashia, Souichi Teladaf and Yoichi Fukuda. A 100 m laser strainmeter system in the Kamioka Mine, Japan, for precise observations of tidal strains. // Journal of Geodynamics Volume 41, Issues 1-3, January-April 2006, Pages 23-29

2. Duncan Carr Agnew, Frank K. Wyatt. Long-Base Laser Strainmeters: A Review // Institute of Geophysics and Planetary Physics Scripps Institution of Oceanography University of California, San Diego, Scripps Institution of Oceanography Technical Report, 6 January 2003

3. Долгих Г.И., Валентин Д.И., Долгих С.Г., Ковалев С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В., Фищенко В.К. Применение лазерных деформографов вертикальной и горизонтальной ориентаций в геофизических исследованиях переходных зон // Физика Земли, 2002, N8, с.69-73.

4. М.Н. Дубров, Д.В. Александров Проведение испытаний мобильного лазерного деформографа на морской экспедиционной станции м. Шульца. Пятый Всероссийский симпозиум «Физика геосфер». Материалы докладов. Владивосток, 3-7 сентября 2007 г. с. 65-70

5. Д.В. Александров, М.Н. Дубров Результаты измерений деформаций Земной поверхности с помощью лазерных интерферометров, Вестник СПбО АИН № 3- 5, отдельный 3-х томник за 2009 г, с 105-113.

6. Александров Д.В., Алешин В.А., Дубров М.Н. Разработка методов линеаризации и анализа данных лазерного интерферометра-деформографа // «Лазеры, измерения, информация», Тезисы докладов конференции, 3-5 июня 2008 г., Санкт-Петербург, с. 15.

**О БАЗОВЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ЭФФЕКТАХ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ВОЗМОЖНОСТЬ
ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА
ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ В НАГРУЖЕННЫХ ОБРАЗЦАХ ГЕОМАТЕРИАЛОВ.
ON THE FUNDAMENTAL EFFECTS ALLOWING THE INFLUENCE OF
ELECTROMAGNETIC PULSES OVER MICROCRACKING IN
LOADED SPECIMENS OF MATERIALS**

Л.М. Богомолов¹, А.С. Закупин², В.А. Гаврилов³, В.А. Мубассарова²

¹- Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН

²-Научная станция РАН в г. Бишкеке, Киргизстан,

³-Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

The work is devoted to the peculiar features of acoustic emission, (AE) responses triggered by external actions of electromagnetic pulses over loaded rocks specimens. New results on AE responses have been obtained, which manifested themselves the rate of defects formation in rocks. The model is proposed that relates origination of AE responses to nonlinear resonant interaction similar to stimulated Brillouin scattering. This model (coming from Nonlinear Optics and Condensed Media Physics) allows understanding of that why triggered variations of AE activity are similar for specimens with differing properties, in particular semi-brittle and pseudo-plastic, dry and water-saturated.

Идея невзрывного, вибросейсмического либо электромагнитного инициирования слабых сейсмических событий для ускорения разрядки избыточных напряжений в геосреде и снижения риска катастрофического землетрясения приобретает все большую популярность. Определенный вклад в решение вопросов, тематически связанных с этим замыслом, может внести лабораторное моделирование процессов разрушения материалов земной коры при воздействиях импульсов физических полей (так называемых энерговоздействиях). Наблюдения влияния нестационарных физических полей на разных масштабах: от лабораторного при характерной длине 1-10 см, до натурного – километрового взаимно дополняют друг друга [1-3]. Влияние физических полей (в частности, электроимпульсов и вибраций) на скорость роста микротрещин в образцах горных пород исследовалось в ряде работ при помощи метода акустической эмиссии, АЭ (обзор в [1]). Был выявлен эффект прироста активности АЭ, стимулированного внешними электромагнитными полями [1,2], который свидетельствует об их влиянии на скорость трещинообразования. Такое влияние электромагнитных полей (ЭМП) определяется их взаимодействием со структурными дефектами в диэлектрических материалах (в частности, в ионных кристаллах). Взаимосвязь электрических полей, обусловленных поляризацией горных пород, с релаксационными процессами (проявлением пластичности), продемонстрирована в [4] для случая образцов без пьезоэлектрических свойств, находящихся при относительно небольших нагрузках

В настоящей работе продолжено изучение особенностей откликов акустической эмиссии на импульсы ЭМП. Дополнительные воздействия импульсными полями осуществлялись в ходе сеансов при испытаниях образцов на ползучесть на бесшумных реологических прессах. Методика исследования детально изложена в [5]. Сигналы АЭ регистрировались в широком частотном диапазоне от 80 кГц до 2,5 МГц, аппаратура работала в ждущем режиме. В проведенной серии экспериментов подтвержден ранее полученный результат, что при нагрузках 70-95 % от

максимальных (для конкретного образца) отдельно взятый отклик не приводит к изменению деформации свыше 10^{-5} , (т.е. соответствующие изменения размеров образцов меньше микрона). В качестве примера на рис. 1 показаны отклики образцов габбро и каменной соли. При длительном воздействии с использованием в качестве источника генератора Г5-54 амплитуда напряженности электрического поля была в пределах 0,8-1,5 кВ/м, а при импульсных воздействиях конденсаторных разрядов – на порядок выше. Эксперименты с образцами каменной соли представляют особый интерес – это псевдопластичный материал, в котором заведомо отсутствуют пьезоэлектрические фракции и пленки водяного пара, существенно влияющие на поведение трещин. Случай рис. 1с демонстрирует, что, во-первых, отклик образца каменной соли не менее контрастен, чем габбро, и, во-вторых, характеризуется режимом пропорционального, самосогласованного прироста активности слабых и сильных событий. При этом слабые события вносят основной вклад в общий прирост числа накопленных событий.

При сравнении результатов с материалами предшествующих работ [2,5] важное значение имеют примеры сходства откликов образцов каменной соли (рис.1с) и габбро (рис.1а), а также сходство с рассмотренными в [5] откликами кварцита и гранита. Оказалось, что по данным АЭ геоматериалы с различными пьезоэлектрическими и реологическими свойствами сходным образом реагируют на воздействие ЭМП. Для объяснения столь нетривиального обстоятельства можно предположить, что во всех случаях под влиянием электромагнитных импульсов происходит возбуждение микроколебаний (слабых вибраций), а они уже оказывают триггерное воздействие на рост микротрещин. Действительно, эффект стимулирования АЭ слабыми низкочастотными вибрациями хорошо известен благодаря работам, где был установлен фундаментальный характер такого влияния вибраций на разных масштабах: от сантиметровых (лабораторных, [6,7]), до километровых и более (натурных, [8]). Отметим, что эти работы сыграли исключительно важную роль в становлении концепции управления режимом выделения накопленной энергии и способствовали постановке экспериментов по моделированию электромагнитных воздействий.

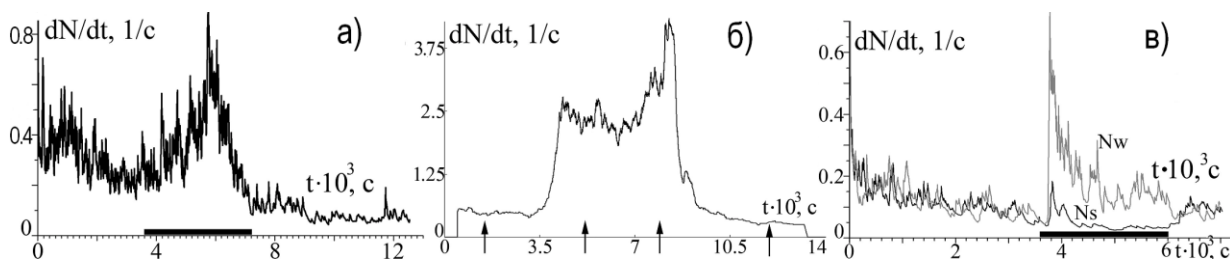


Рис.1. Временные зависимости активности АЭ образцов в сессиях с подачей электроимпульсов при постоянной нагрузке: а) образец габбро при нагрузке 92% от разрушающей и воздействии импульсов Г5-54 (параметры – 30В, 2мкс, 90кГц; б) образец габбро на ступени нагружения 98%, стрелки -серии из 10 конденсаторных разрядов с максимальным напряжением 500В, длительностью около 1мкс; в) селективная активность образца каменной соли при нагрузке 70 % от разрушающей, рассчитанная по выборкам событий с меньшей (N_w) и большей N_s амплитудами, $N(t) = N_w(t) + N_s(t)$. Параметры- 60В, 5мкс, 2кГц. Полоса на графиках а), в) указывает время воздействия импульсов генератора Г5-54

По оценкам [9], эффект отклика активности АЭ образцов горных пород проявляется, когда амплитуда колебания давления становится порядка 10^{-6} от уровня главного напряжения. При воздействии высоковольтных разрядов возможность генерации колебаний с амплитудой такого порядка вытекает непосредственно из уравнений электродинамики, описывающих пондермоторные силы, действующие на диэлектрические материалы с дисперсией [10]. Однако до настоящего времени оставался загадочным механизм возбуждения “аномальных” вибраций в сессиях с генератором Г5-54, т.е. при относительно небольшой напряженности поля. По мнению авторов, важным обстоятельством является резкость изменения поля при подаче прямоугольных импульсов. При этом может проявиться такой волновой эффект как нелинейное резонансное взаимодействие звуковых и электромагнитных волн, с резонансом на разностной частоте. Для параметров импульсов Г5-54 в экспериментах по электровоздействию на АЭ образцов каменной соли крутые фронты нарастания с длительностью менее 0,1 мкс обеспечивают возбуждение большого числа гармоник в полосе частот выше $\omega \sim 10^7$ 1/с. Среди них найдутся частоты ω_1, ω_2 , лежащие в диапазоне 10^7 1/с, для которых разность $\omega_1 - \omega_2$ попадает в диапазон звуковых частот ω_s от сотен 1/с до 10^3 1/с. При таком резонансе звуковая волна с частотой $\omega_s = \omega_1 - \omega_2$ будет

усиливаться. По-существу, эффект является низкочастотным аналогом известного в нелинейной оптике эффекта вынужденного рассеяния Бриллюэна [11] – рассеяния света на временных флуктуациях диэлектрической проницаемости, возникающих вследствие флуктуаций плотности, т.е. при деформации. В нагруженных образцах при образовании микротрещин в окружающем объеме вещества несомненно имеют место неоднородные возмущения деформации. Если эти возмущения получают дополнительную энергию и импульс от внешнего поля, а акустическая добротность среды достаточно велика, колебания распространяются и могут оказывать триггерное влияние на рост трещины в другой области. Далее процесс повторяется и, таким образом, может произойти “саморазгон” роста микротрещин, проявляющийся в экспериментах как временный прирост активности АЭ. Для горных пород без крупных трещин добротность при атмосферном давлении $Q \sim 100-400$, а в сжатом состоянии может достигать нескольких тысяч [12]. Фактор добротности имеет решающее значение. Так как благодаря нему взаимодействие электромагнитных волн со звуковыми может продолжаться намного дольше времени пробега упругой волны, возникающей при образовании трещины. При этом устраняется неэффективность взаимодействия электромагнитных волн с частотой $\omega \sim 10^7$ 1/с (соответствующей длине волны $\lambda = 2\pi C/\omega \sim 100$ м) с объектами (флуктуациями) малых размеров (от длины микротрещины порядка 10-100 мкм, до нескольких сантиметров, т.е. характерного размера образца).

Электроды, на которые подавались импульсы генератора Г5-54, устанавливались на противоположных боковых поверхностях испытываемого образца. При этом переходные процессы описываются как распространение двух электромагнитных волн с векторами Умова-Пойнтинга, направленными противоположно друг другу (рис. 2). В теоретической модели вынужденного рассеяния Бриллюэна [11] это соответствует случаю “рассеяния назад”, при котором условие усиления звуковой волны записывается в форме:

$$\omega_s = (V_s/C) \cdot (\omega_1 + \omega_2) \approx 2 (V_s/C) \omega_{1,2}, \quad (1)$$

где V_s – скорость звуковой волны, C – скорость электромагнитных волн, для сплошной консолидированной среды обычно $V_s/C \sim 10^{-5}$. Поэтому условие (1) совместимо с требованием $\omega_s = \omega_1 - \omega_2$, если $\omega_{1,2} \sim 10^7$ 1/с, а частота звуковых волн находится в диапазоне от сотен 1/с до 10^3 1/с. При рассматриваемом классическом (неквантовом) варианте модели вынужденного рассеяния Бриллюэна [11] макроскопическим проявлением этого эффекта, наряду с возбуждением колебаний на частоте ω_s , является различие затухания волн ω_1 , ω_2 , (см.рис.2). Оценить амплитуду микровибраций, возникающих при вынужденном Бриллюэновском рассеянии можно при помощи следующей формулы [11]:

$$\delta\sigma \approx \pi \cdot \varepsilon_0 \varepsilon_{(1)} \cdot G^2 \omega_s \cdot E_{\sim}(\omega_1, k_1) \cdot E_{\sim}(\omega_2, k_2) / (2\rho V_s \Gamma_s), \quad (2)$$

где обозначено: ρ – плотность материала, G – упругий модуль, так что $V_s^2 \sim G/\rho$, Γ_s – коэффициент поглощения звука, выражающийся через добротность Q соотношением $\Gamma_s = \omega_s/2\pi Q$, $E_{\sim}$ – амплитуда напряженности электрического поля в волне с указанной частотой и волновым числом k , $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, $\varepsilon_{(1)}$ – возмущение диэлектрической проницаемости при флуктуации плотности, которое в приближении теории возмущений оценивается по формуле $\varepsilon_{(1)} \sim (d\varepsilon/d\rho)\sigma_{\sim}$. Если для грубых оценок взять $\sigma_{\sim} \sim 0,2-0,5 \sigma$ (имеем дело с окрестностью растущей трещины), то подстановка всех промежуточных соотношений в (2) приводит к выражению:

$$\delta\sigma \sim \pi^2 \cdot 1/2 \cdot \varepsilon_0 \varepsilon \cdot E_{\sim}^2, \quad (3)$$

которое подтверждает, что в обсуждаемых экспериментах при характерных значениях $E \sim 1$ кВ/м (случай использования Г5-54) действительно могут возбуждаться колебания с амплитудой давления (напряжения) порядка $10^{-7}-10^{-6}$ относительно уровня главного сжимающего напряжения. Важно отметить, что амплитуды колебаний напряжения на частоте ω_s оказались примерно в 10 Q раз больше значений, получаемых по стандартным выражениям для плотности пондермоторных сил в квазистационарном случае [10], при одних и тех же величинах электрической напряженности E . Вышерассмотренный механизм возбуждения колебаний объясняет, в какой-то степени, сходство акустоэмиссионных откликов на действие слабых низкочастотных вибраций и на импульсы ЭМП, которое ранее отмечалось в ряде работ.

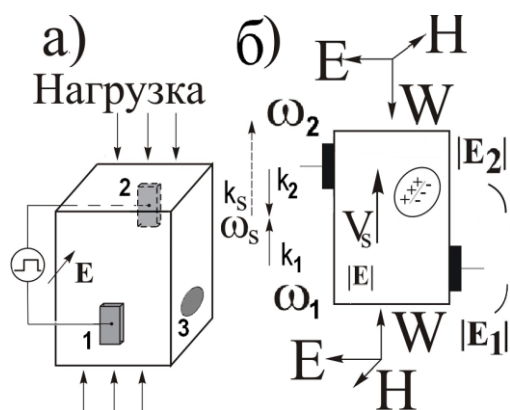


Рис.2.Аналог нелинейного трехволнового взаимодействия в классической физике: резонанс на биениях электромагнитных волн с близкими частотами ω_1 , ω_2 : а) типовая схема размещения электродов на образце; б) геометрия задачи с областью, где при росте трещины возникают колебания диэлектрической проницаемости. Показаны направления распространения взаимодействующих волн и усиленной звуковой волны для условного случая, когда волна с частотой $\omega_1 > \omega_2$ “идет снизу”. Область сильных флуктуаций выделена эллипсом. 1, 2- подводящие электроды, 3 – место расположения датчика АЭ либо геофона.

Гипотеза о механизме триггерного влияния на АЭ электромагнитных импульсов через возбуждение низкочастотных вибраций выглядит как неожиданная, поскольку широко распространено представление, что реакция среды (изменение в процессе деструкции) начинается на низших масштабных уровнях, а малым размерам соответствуют более высокие частоты. Однако имеются данные об опережающем возбуждении именно низкочастотных вибраций в сессии с электровоздействием. Эксперимент был проведен на гравитационно- рычажном прессе в 2008 г. с целью сравнения потока обычных сигналов АЭ (с локализацией спектра в полосе 100-500 кГц) и вариаций уровня средней амплитуды низкочастотных сигналов (так называемой геоакустической эмиссии (ГАЭ) в диапазоне частот 10^2 - 10^3 Гц), которые регистрировались при помощи геофона пьезоэлектрического типа, идентичного применяемому при скважинных измерениях [13]. В измерительных сессиях включался либо высокочастотный, либо низкочастотный канал, во избежание взаимного влияния первичных пьезопреобразователей. Для испытанного гранитного образца при порядка 80% от разрушающей отклик активности АЭ на импульсы ЭМП (конденсаторные разряды) наступал задержкой 600-1000 с. На рис.3 показано изменение уровня амплитуды ГАЭ в ходе сеанса при воздействии таких же импульсов на 2-7 мин. Прирост уровня ГАЭ произошел раньше, по сравнению с характерной задержкой отклика активности высокочастотных АЭ. Но именно это следует из рассуждений о резонансном усилении низкочастотных вибраций за счет вынужденного Бриллюэновского рассеяния.

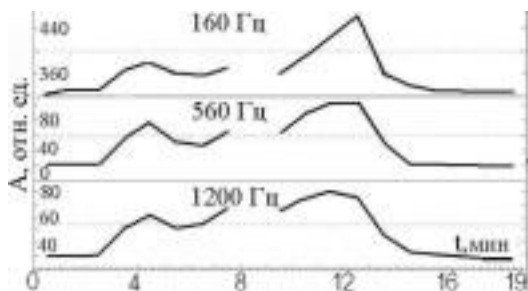


Рис.3. Временная зависимость амплитуды низкочастотной эмиссии на различных частотах. Конденсаторные разряды (максимальное напряжение 600 В, длительность ~ 2 мс) проводились раз в минуту с 2 по 7 минуту данного сеанса. Разрыв графиков связан с паузой в регистрации, необходимой для выгрузки данных.

На основе полученных результатов и предложенной модели продолжение исследований триггерных эффектов ЭМП может проводиться в обычном для современной физики режиме выдвижения и экспериментальной проверки гипотез с последующим уточнением модели и т.д.

Литература

1. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука. 2003. 270 с.
2. Bogomolov L.M., P'ichev P.V., Novikov V.A. et al. AE response of rocks to electric power action as seismic-electric effect manifestation. // Annals of Geophysics. 2004. V. 47. N. 1. P. 65-72.
3. Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В., Авагимов А.А., Зейгарник В.А. Воздействие мощных электромагнитных импульсов на сейсмичность Средней Азии и Казахстана. // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4-5. С. 152-160.
4. Куксенко В.С., Махмудов Х.Ф., Пономарев А.В. Релаксация электрических полей, индуцированных механической нагрузкой в природных диэлектриках. // ФТТ. 1997. Т. 39. №7. С. 1202-1204

5. Закупин А.С., Аладьев А.В., Богомолов Л.М. и др. Взаимосвязь электрической поляризации и акустической эмиссии образцов геоматериалов в условиях одноосного сжатия. // Вулканология и сейсмология. 2006. № 6. С. 22-33.
6. Куксенко В.С., Манжиков Б.Ц., Тилегенов К. и др. Триггерный эффект слабых вибраций в твердых телах (горных породах). // ФТТ. 2003. Т. 45. № 12. С. 2182-2186.
7. Мирзоев К.М., Виноградов С.Д., Рузибаев З. Влияние микросейсм и вибраций на акустическую эмиссию. // Физика Земли. 1991. № 12. С. 69-72.
8. Мирзоев К.М., Негматуллаев С.Х., Дастури Т.Ю. Влияние механических вибраций на характер высвобождения сейсмической энергии в районе водохранилища Нурекской ГЭС. Сейсмологические исследования в районах строительства крупных водохранилищ Таджикистана. Душанбе: Дониш. 1987. С.101-119.
9. Богомолов Л.М., Манжиков Б.Ц., Трапезников Ю.А. и др. Виброупругость, акустопластика и акустическая эмиссия нагруженных горных пород. // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. № 10. С. 1678-1689
10. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука. 2 изд. 1982. 620 с
11. Шуберт М, Вильгельми Б. Введение в нелинейную оптику. М: Мир. 1973. 244 с.
12. Назаров В.Е., Радостин А.В. Нелинейные волновые процессы в упругих микронеоднородных средах. Нижний Новгород: ИПФ РАН. 2007. 256 с.
13. Гаврилов В.А., Морозова Ю.В., Сторчеус А.В. Вариации уровня геоакустической эмиссии в глубокой скважине Г-1 (Камчатка) и их связь с сейсмической активностью// Вулканология и сейсмология. 2006. № 1. С.52-67.

ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО И ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ГЕОАКУСТИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В ОСАДОЧНЫХ ПОРОДАХ НА СТАНЦИИ КАРЫМШИНА

INVESTIGATION OF DEFORMATION AND HIGH FREQUENCY GEOACOUSTIC PROCESS IN SEDIMENTARY AT KARYMSHINA STATION

И.А. Ларионов, Ю.В. Маранулец, Б.М. Шевцов

Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН

Investigation of sedimentary deformations is determined by their significant role in many geophysical processes which are considered in seismology, oceanology, mining and so on. Many natural phenomena in sedimentary are the result of its low strength and high plasticity, which are determined by external factors. In mediums with similar properties favorable conditions are formed, where even weak deformation changes occur. This changes entail clearly registered acoustic signals, that is why it is perspective to allocate detection systems in such mediums and to investigate earthquake precursors the appearance of which is determined by sedimentary properties. In the paper the results of joint researches of deformation and high frequency geoacoustic process in sedimentary at Karymshina station are considered. Deformation measurements were carried out by unequal-arm laser deformograph-interferometer. Geoacoustic emission is registered by directed acoustic receivers oriented vertically downward and located around the measuring arm of the deformograph in artificial pools.

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 [1,2], 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.

В настоящее время в системе регистрации геоакустических сигналов на станции Карымшина используется приемная система направленных акустических приемников, установленных в небольших искусственных водоемах. С выходов приемников сигналы в диапазоне частот 0.1-11000 Гц усиливаются, обрабатываются фильтрами 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 принцип организации наблюдений с помощью направленных приемников изложен в работе [3]. В непосредственной близости от акустических приемников установлен лазерный деформограф-интерферометр, неравноплечного типа с измерительной базой 18 метров, позволяющий оценивать относительные деформации до 10^{-8} [4]. Для удаления из регистрируемого сигнала метеорологической составляющей был применен метод дифференцирования и в результате получена временная зависимость скорости изменения деформаций. Для анализа сейсмической обстановки использовались данные Камчатского филиала геофизической службы РАН.

Сейсмические события, возникающие в радиусе до 250 км и свыше 11 класса, являются одними из естественных калибровочных сигналов, регистрируемыми системами наблюдений (рис.1.) По этим оценкам скорости продольных и поперечных волн близки к справочным скоростям в коренных породах и составляют порядка 5-6 км/с и 3-4 км/с соответственно.

В данной работе основное внимание уделено деформационным и акустическим измерениям осадочных пород в периоды подготовки сейсмических событий. При анализе широкополосного акустического сигнала обнаруживается достаточно простая его структура, представляющая собой череду случайных импульсов ударного происхождения с частотой заполнения около нескольких кГц. Наблюдаемые геоакустические импульсы с некоторым фоновым уровнем формируют геоакустическую эмиссию.

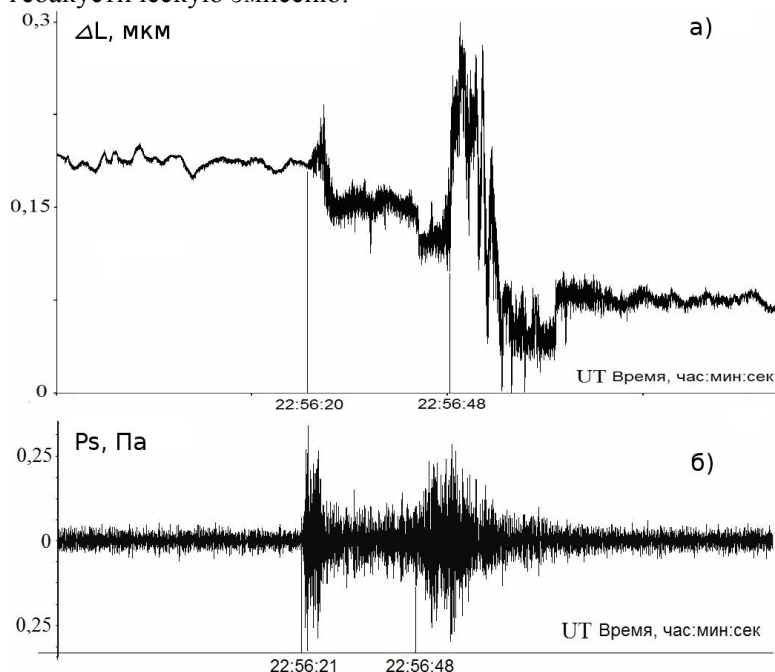


Рис.1. Сейсмическое событие 29 апреля 2007 года, класс 11,2, расстояние до пункта наблюдений 197 км. Зарегистрировано а) Деформографом-интерферометром (ΔL), б) Акустическим приемником (Ps).

Как показано в работах [5-9], 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 до нескольких десятков часов имеет возмущенный вид. Он определяется повышенным фоновым уровнем и увеличенной амплитудой и частотой следования высокочастотных импульсов.

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.

За время наблюдений было выявлено два вида деформационных изменений и соответствующих им акустических возмущений в преддверии сильных сейсмических событий. На рис. 2 показаны графики сигналов с обеих систем наблюдений, произошедших за сутки до сейсмического события, на которых видно, что деформации с амплитудой до 1 мкм и скоростью до 100 нм/с, в направлении растяжения и сжатия, соответствуют возмущению до 2,5 мПа в высокочастотном акустическом сигнале [11].

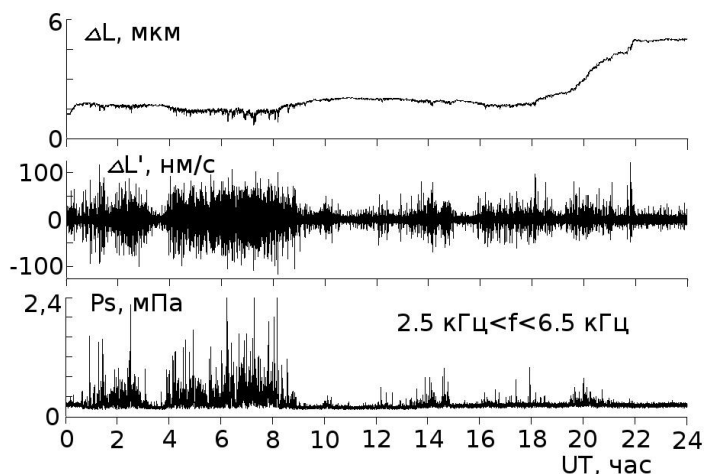


Рис.2. Деформационные изменения (ΔL), скорость деформаций ($\Delta L'$) и высокочастотный акустический сигнал (P_s) 1 мая 2007 года.

Второй вид возмущений наблюдаемых полей показан на рис. 3, из которого видно, что за 36 часов до землетрясения класса 11,9 произошло возмущение геоакустического сигнала, продолжительностью около 12 часов. Амплитуда возмущения в высокочастотном диапазоне составила около 5 мПа и, как видно из увеличенного фрагмента, представляет собой череду импульсов большой амплитуды и повышенный фоновый уровень, в сравнении со спокойным периодом до и после возмущения. Одновременно с изменениями в акустическом сигнале произошел рост деформационного процесса в сторону растяжения базы деформографа, который составил в начальный период около 40 мкм за 5 часов. В дальнейшем происходили резкие скачки деформаций, а в целом изменение составило порядка 6 мм. На увеличенных фрагментах рис. 3 показаны некоторые участки в период возмущения (а, б) и для сравнения – в спокойный период наблюдения (в).

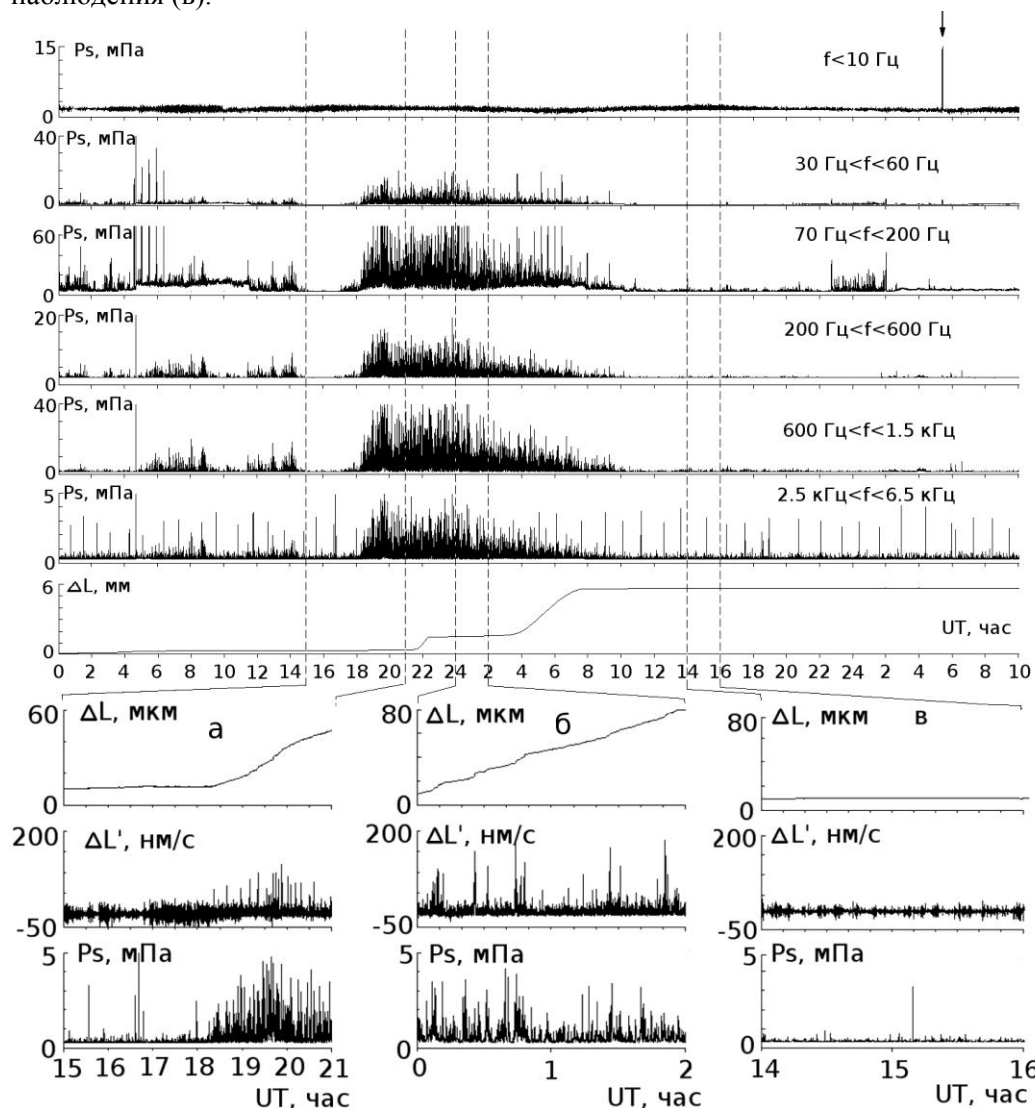


Рис.3. Акустический сигнал в частотных диапазонах и деформационный процесс с 6 по 8 октября 2009 года. В нижней части (а, б, в) показаны увеличенные фрагменты записи. ΔL – деформации, $\Delta L'$ – скорость деформаций, P_s – акустическое давление на увеличенных фрагментах $f = 2.5-6.5$ кГц.

Этот вид возмущений регистрируется значительно чаще первого, однако, как показали наблюдения, существует определенный порог деформационных изменений, при превышении которого происходит одновременное возмущение деформационных и акустических сигналов. Величина этого порога варьируется в разных случаях.

Таким образом, показано, что геоакустическая эмиссия индуцируется локальными деформационными процессами, а интенсивные деформационно-акустические возмущения возникают, как правило, в периоды подготовки сейсмических событий и могут рассматриваться в качестве комплексных предвестников землетрясений. Однако механизм такого взаимодействия является нелинейным процессом и подлежит дальнейшему изучению.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта ДВО РАН 10-III-B-02-021.

Литература

1. Соболев Г. А., Пономарев А. В. Физика землетрясений и предвестников. // М: Наука. 2003. 270 с.
2. Соболев Г. А., Асатрян 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.
3. Купцов А.В. Изменение характера геоакустической эмиссии в связи с землетрясением на Камчатке. // Физика Земли, 2005, № 10, С. 59-65.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.-Петербург. 2005. Т. 2. С. 159-161.
8. Купцов А. В., Ларионов И. А., Шевцов Б. М. Особенности геоакустической эмиссии при подготовке камчатских землетрясений. // Вулканология и сейсмология. 2005. № 5. С. 45-59.
9. Купцов А. В., Ларионов И. А., Шевцов Б. М. Экспериментальные исследования аномалий геоакустической эмиссии, соответствующей ранней стадии развития сейсмических событий. // Петропавловск-Камчатский. Вестник КРАУНЦ, серия науки о Земле. 2004. № 3. С. 46-52.
10. Ларионов И.А. Акустическая эмиссия деформаций осадочных пород. //Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. с.Паратунка, ИКИР, 2008, 19с.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВРЕМЕННОГО РЯДА ГЕОАКУСТИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ СО СТАНЦИИ НАБЛЮДЕНИЯ «МИКИЖА» В ПЕРИОД 2002-2007 гг. STATISTICAL ANALYSIS OF A TIME SERIES OF GEOACOUSTIC DISTURBANCES FROM «MIKIZHA» OBSERVATORY DURING 2002-2007

М.А. Мищенко

Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН

Since 2002 IKIR FEB RAS has been carrying out geoaoustic emission monitoring. As the observation time series grew, the necessity to organize, analyze and classify the data appeared. The paper is devoted to the results of investigation of geoaoustic disturbance series, their comparison with meteorological and seismic catalogs and further statistic analysis. Event localization was considered; response zones, disturbance types, their parameters and selection criteria were determined. The results of statistical processing of the data are shown.

Проведенными ранее исследованиями установлено, что в 1.5 суточном временном интервале перед сейсмическими событиями на Камчатке наблюдаются возмущения геоакустической эмиссии (ГАЭ) диапазоне частот - единицы килогерц [1]. Данное явление обусловлено возникновением отклика породы на динамическую локальную перестройку структуры поля напряжений и сопровождается испусканием импульсов высокочастотных акустических волн как из-за образования микроразломов и трещин, так и из-за подвижек в существующих разломах, заполненных обычно водонасыщенными осадочными породами [2].

Для регистрации сигналов ГАЭ в ИКИР ДВО РАН используется приемная система, установленная на дне озера Микижа. Система состоит из 4-х направленных гидрофонов, три из

которых ориентированы по сторонам света (кроме запада) и один направленный вертикально вниз. Регистрация и первичный анализ сигналов ГАЭ производится как во всем принимаемом диапазоне частот (0 – 22 кГц), так и на выходе полосовых фильтров, делящих частотный диапазон на несколько поддиапазонов. Такая система позволяет оперативно выявлять акустические сигналы различной природы и при этом анализировать их в широком диапазоне. Сигналы с выходов 4-х пьезокерамических преобразователей усиливаются, оцифровываются с частотой дискретизации 22 кГц и записываются на "жесткий диск" первого персонального компьютера [3]. В качестве устройства для оцифровки используются звуковые карты. Одновременно с записью широкополосных сигналов на втором персональном компьютере реализована система частотно-временной обработки (фильтрация, вычисление абсолютного значения и усреднение значения амплитуды сигнала на интервале 4 секунды). Фильтрация сигналов производится в семи частотных поддиапазонах: 0.1-10, 30-60, 70-200, 200-700, 700-2000, 2000-6500, 6500-11000 Гц.

Анализ полученных данных показывает, что аппаратура регистрирует сигналы землетрясений, возмущения ГАЭ, обусловленные динамикой деформационного процесса, а также сигналы, сгенерированные воздействием метеофакторов (осадки, ветер) и сигналы техногенного и биологического характера [3]. На рис.1 для примера представлено возмущение ГАЭ за 1.5 суток перед землетрясением с $K=13.8$, произошедшим 24 августа 2006 г. на расстоянии 220 км от пункта наблюдений.

С ростом временного ряда наблюдений появилась необходимость в систематизации, классификации геоакустических возмущений, их сопоставлению с метеорологическими и сейсмическими каталогами и последующему статистическому анализу. Для автоматизации процесса выявления возмущений была разработана методика и создан программный комплекс.

Для обработки и анализа данных был рассмотрен ряд наблюдений геоакустического сигнала за период 01.11.2002 - 31.12.2007 гг. На первом этапе был подготовлен временной ряд достоверной регистрации геоакустического сигнала. Далее, были определены виды возмущений ГАЭ. Выявлено, что все возмущения ГАЭ либо имеют характерное увеличение среднего уровня сигнала в несколько раз (рис.2), либо носят импульсный характер (отдельные квазипериодически появляющиеся сигналы небольшой продолжительности (рис.3).

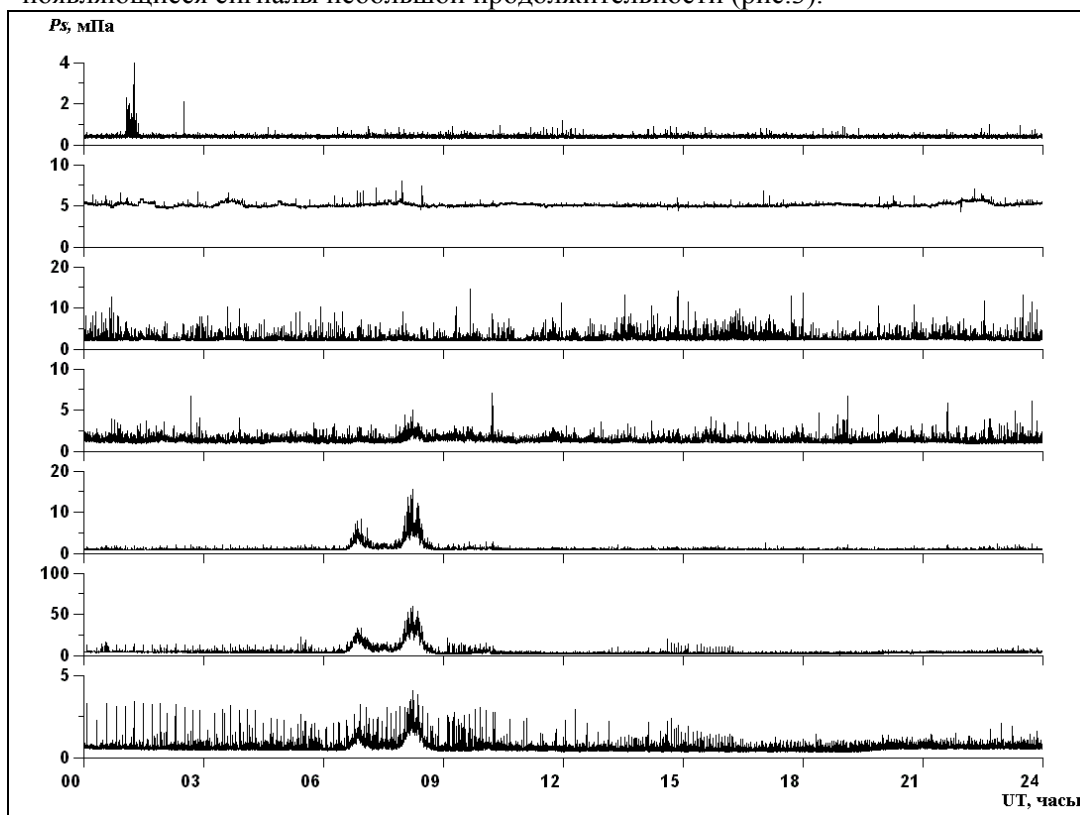


Рис. 1. Пример возмущения высокочастотной ГАЭ перед землетрясением 24 августа 2006 г.

Для автоматического выявления возмущений были определены их пороговые характеристики. Возмущения первого типа (рис.2) имеют длительность более 15 минут, превышение среднего уровня сигнала более чем 4 раза относительно фона. Фоновый уровень определяется в зависимости от сезона года. Для автоматизированного выявления таких возмущений используется следующая методика, основанная на расчёте математического

ожидания. Суточная реализация данных усредняется пятиминутным окном. Далее усреднённый ряд анализируется на наличие возмущений длительностью более 15 минут.

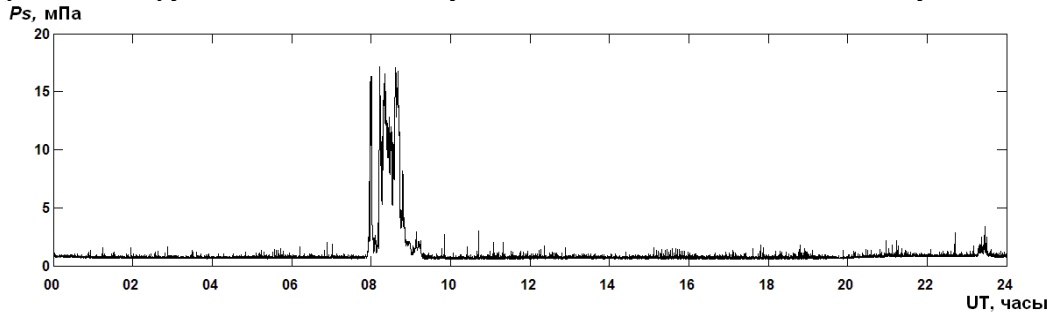


Рис. 2.
Пример
возмущения
ГАЭ.

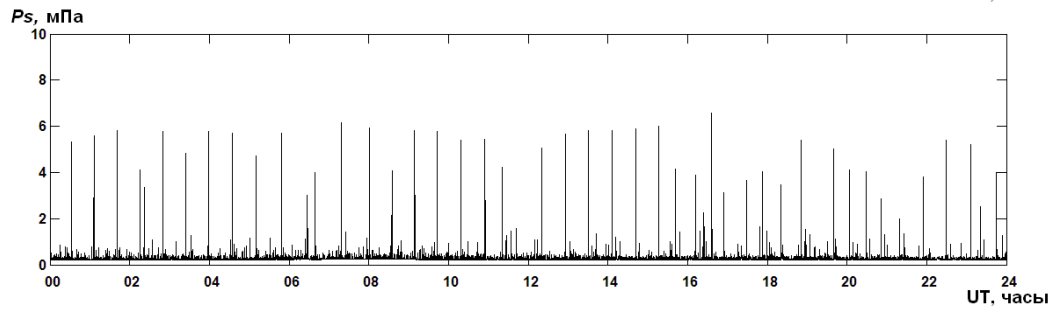


Рис. 3.
Пример
возмущения
ГАЭ.

На (рис.4) изображён пример суточной реализация данных с возмущением первого типа (верхний график). На нижнем графике изображён ряд данных, усреднённый на интервале 5 минут и порог (прямая линия), превышающий фоновый уровень в 4 раза.

Для возмущений, имеющих импульсный характер (рис.3), определены следующие пороговые характеристики: длительность аномалии более 1 часа, скважностью появления импульсов - от единиц до десятков минут. Следует отметить, что предыдущая методика усреднения сигнала не подходит для коротких импульсных сигналов, поэтому используется оценка среднеквадратичного отклонения (СКО) для трёхминутного окна данных и сравнение с СКО фоновое периода. Превышение СКО на текущем интервале в 4 раза сигнализирует о начале возмущения. На (рис.5) изображён пример суточной реализация данных с возмущением второго типа (верхний график). На нижнем графике изображён модифицированный ряд данных, полученный после расчёта СКО на трехминутном интервале и порог, превышающий СКО фоновое уровня в 4 раза.

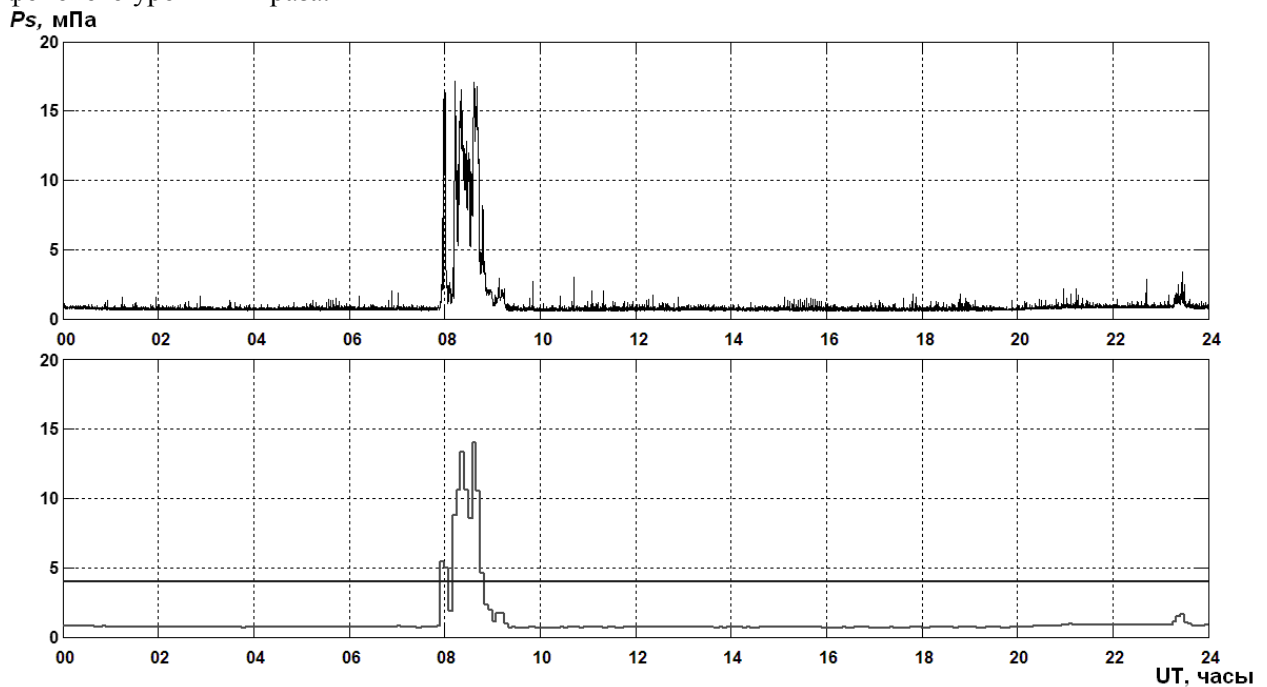


Рис. 4. Пример работы системы выявления возмущений ГАЭ.

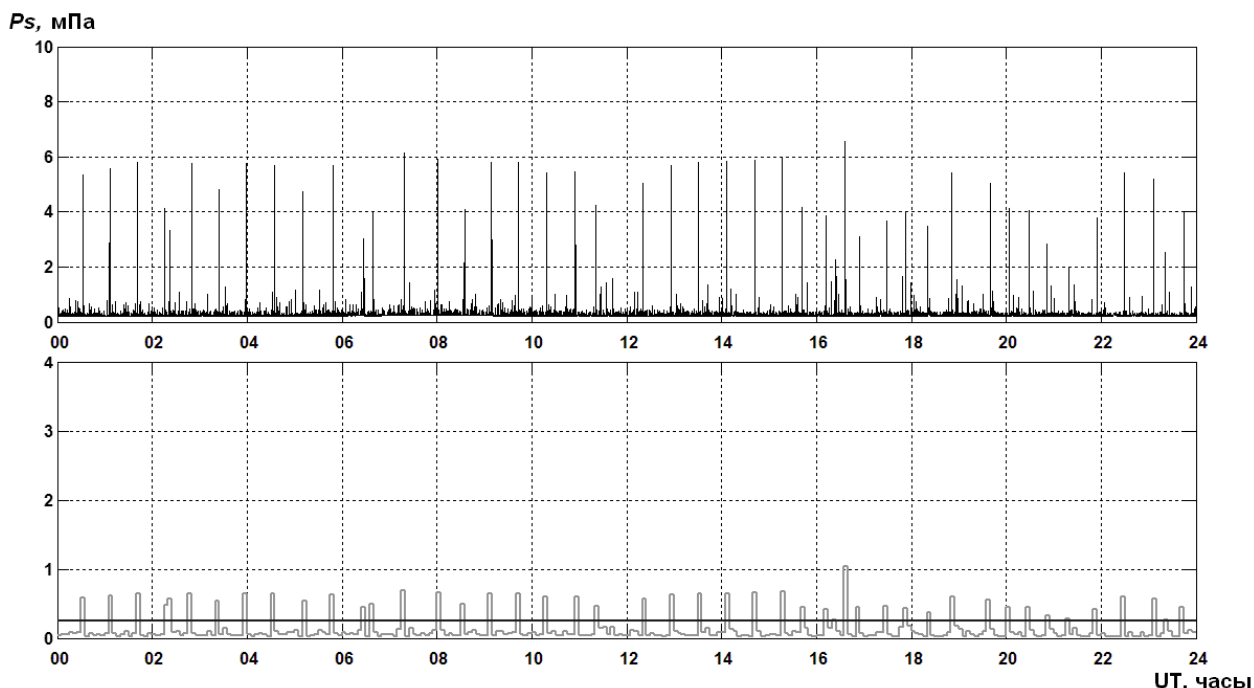


Рис. 5. Пример работы системы выявления возмущений ГАЭ.

Таким образом, временной ряд данных анализируется дважды – вначале на наличие возмущений первого типа, а затем – второго. В результате анализа получен каталог возмущений геоакустической эмиссии за период 2002 - 2007 гг. Всего за указанный период зарегистрировано 710 возмущений.

На следующем этапе произведена очистка каталога от возмущений, обусловленных действием неблагоприятных метеоусловий (наличие осадков и ветра > 5 м/с). Установлено, что многие возмущения ГАЭ первого типа обусловлены неблагоприятными метеоусловиями, в то время как возмущения второго типа часто можно выделить на фоне дождя, и вообще возмущения такого импульсного типа не могут возникать как следствие плохой погоды. Поэтому при простом сопоставлении каталогов геоакустических возмущений и метеопараметров можно удалить возмущения не метеорологической природы. Учитывая этот факт, было произведено следующее. Из геоакустического каталога удалены сплошные возмущения, зарегистрированные в периоды плохой погоды. Каталог возмущений импульсного характера остался без изменений. В результате такой фильтрации, был получен каталог возмущений геоакустической эмиссии за период 2002 - 2007 гг., не обусловленных действием неблагоприятных метеоусловий. Всего в каталоге осталось 445 возмущений.

Полученная база данных по возмущениям геоакустической эмиссии позволяет в дальнейшем производить статистический анализ ее аномалий, предшествующих землетрясениям. Возможно использовать данный каталог для исследования связи возмущений эмиссии с различными геофизическими полями.

Литература

1. Купцов А.В. Изменение характера геоакустической эмиссии в связи с землетрясением на Камчатке // Физика Земли. 2005. № 10. С. 59-65.
2. Долгих Г.И., Купцов А.В., Ларионов И.А. и др. Деформационные и акустические предвестники землетрясений // ДАН. 2007. Т. 413. № 5. С.96-100.
3. Марапулец Ю.В., Мищенко М.А., Щербина А.О., Шадрин А.В. Методы исследования высокочастотной геоакустической эмиссии. // Монография. П-Кам.:КГТУ, 2008., 106 с.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ В ИОНОСФЕРНО-МАГНИТОСФЕРНОМ КОНТУРЕ

ELECTROMAGNETIC FLUCTUATIONS IN IONOSPHERE-ATMOSPHERE CONTOUR

В.П.Сивоконь

Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН

The observation method of electromagnetic fluctuations in a range of geomagnetic pulsations based on registration of variations in a range SLF-VLF of hissings, modulated by these electromagnetic fluctuations, is offered. The observation over natural noises in electrical networks of Kamchatka have allowed to find out electromagnetic fluctuations in a range of frequencies $(35 \div 67) \cdot 10^{-3}$ Hz. It is shown, that these fluctuations are possible in ionosphere-atmosphere oscillatory contour formed power magnetic tubes (inductance) and a site of electrojet-Earth (capacity).

В основу современных представлений о механизме генерации пульсаций положен принцип проточного циклотронного мазера [Трахтенгерц и др.,1986]. Известно [Семенов,1973], что длина открытого резонатора, каковым в данном случае является магнитная силовая трубка, содержащая волокно повышенной концентрации плазмы, должна быть больше или сопоставима с длиной волны генерируемого излучения. Расчёты показали, что такое требование выполняется только для пульсаций Pc1. Анализ ситуации показывает, что генезис более низкочастотных, чем Pc1 пульсаций, можно объяснить на основе ионосферно-магнитосферного контура, в котором роль индуктивности играют силовые трубки, а ёмкости, соответственно, участок электроджет - Земля. Использование индуктивности для оценки переходных процессов в эквивалентной токовой ионосферно-магнитосферной системе применялось ранее в работах [Мальцев и др.,1975]. В разработанном подходе для получения колебательного контура оставалось учесть наличие ёмкости электроджет-Земля.

В качестве «приёмных устройств» вариаций электроджета используются линии электропередач протяжённостью около 100 километров. Они имеют ёмкость, индуктивность и сопротивление, т.е. обладают резонансными свойствами. При этом резонансная частота равна ≈ 3 килогерц, а добротность составляет ≈ 20 .

В ходе наблюдений были обнаружены возмущения, характеризующиеся внезапным повышением уровня шума в полосе от 2 кГц до 19 кГц. В качестве примера на рис.1 приводится запись 1 ноября 2008 года 21.00 UT в полосе частот 3-11 кГц. Колебательный процесс характеризуется периодом, который изменяется в пределах от 15 до 29 секунд, что соответствует

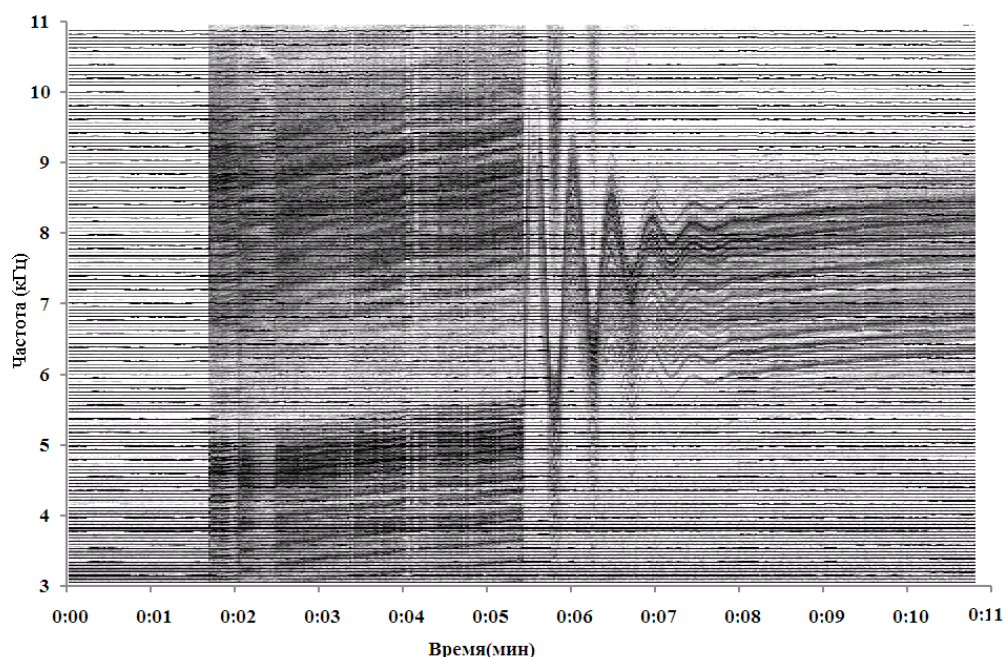


Рисунок 1.

частоте $(35 \div 67) \cdot 10^{-3}$ Гц. В результате обработки наблюдений получено среднее значение периода и частоты, соответственно 26 секунд и $38 \cdot 10^{-3}$ Гц. Декремент затухания колебательного процесса составляет несколько минут. При этом само возмущение по времени длится от десятка минут до получаса.

С момента обнаружения аномальных возмущений рассматривалась возможность их генезиса, как результата внутренних процессов, происходящих в системе электроснабжения. В мае-июне 2008 года, производилась сверка времени наблюдения возмущений с оперативными переключениями и авариями в электросетях, при этом никакой взаимосвязи обнаружено не было. При сопоставлении спектрограмм до и в момент возмущения, оказалось, что уровень гармоник сети не меняется, а увеличивается уровень шума, что делает маловероятным происхождение возмущения внутри сети.

Результаты наблюдений в 2008 году показали, что время наблюдения носит сезонный характер и проявляется в основном (время мировое) утром в весенне-летний период и вечером в осенне-зимний период.

Из спектрограммы рис.1. видно, что колебательный процесс затухающий и, следовательно, по нему можно определить декремент затухания $\tau = 152$ секунды, а затем рассчитать

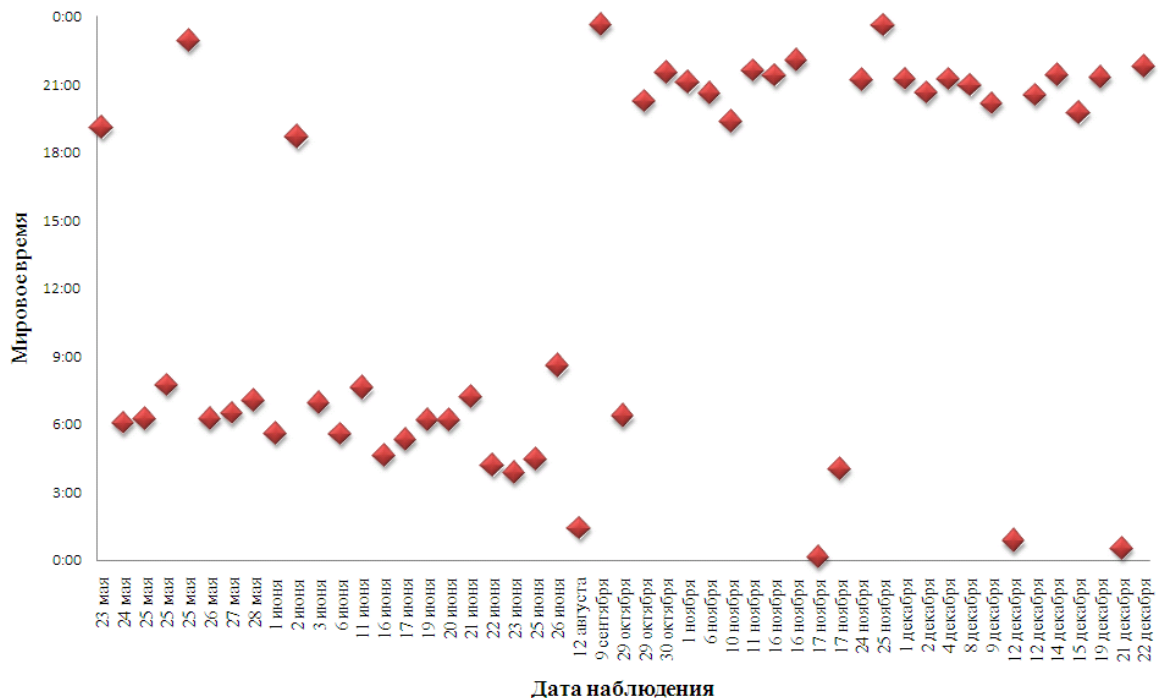


Рисунок 2.

добротность контура, в котором развиваются эти колебания:

$$Q = \frac{\omega \tau}{2} \approx 18,4$$

где $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$, $f = 38 \cdot 10^{-3}$ Гц.

Исходя из приведённых в [Boteler et al.,2000] оценочных величин активного сопротивления электроджета примем $R \approx 0,75$ Ом. Тогда для индуктивности

$$L = \frac{QR}{\omega} \approx 57 \text{ Гн}$$

и соответственно для ёмкости

$$C = \frac{1}{\omega^2 L} \approx 0,3 \text{ Ф.}$$

Для оценки индуктивности силовых трубок используем выражение, полученное в работе [Ландау, Лифшиц. 1982] для индуктивности тонкого кольца из провода

$$L = 4\pi b \left(\ln \frac{8b}{a} - \frac{7}{4} \right)$$

где b - радиус кольца и a - радиус провода. В качестве радиуса силовой трубки a , как эквивалентного провода примем ларморовский радиус, который по данным [Хесс, 1972] составляет $5 \cdot 10^2 - 7 \cdot 10^3$ см. Расчёты с использованием приведённого выражения показывают, что величина индуктивности, полученной, исходя из параметров колебательного процесса, может быть реализована в силовых трубках внешнего радиационного пояса.

Наблюдения за естественными шумами в электрической сети Камчатки позволили обнаружить аномальные возмущения в диапазоне частот 2-19 кГц. В структуре возмущений присутствует колебательный процесс с частотой $\approx 38 \cdot 10^{-3}$ Гц, обусловленный, вероятнее всего, вариациями токовой структуры электроджета. Сезонная зависимость времени регистрации возмущений служит дополнительным подтверждением этого предположения. Колебательные процессы вероятнее всего происходят в ионосферно-магнитосферном контуре, образованном индуктивностью силовых трубок магнитного поля Земли и емкостью электроджет-Земля.

Литература

- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред, М. Наука, 1982.–620 с.
 Мальцев Ю.П., Леонтьев С.В., Ляцкий В.Б. Индукционные электрические поля во время суббури // Геомагнетизм и аэрономия. 1975. Том 15, №3. – С.519-523.
 Семенов Н.А. Техническая электродинамика. – М.:Связь,1973. – 480 с.
 Трахтенгерц В.Ю., Тагиров В.Р., Черноус С.А. Проточный циклотронный мазер и импульсные ОНЧ-излучения // Геомагнетизм и аэрономия. 1986. Том 26, №1.– С.99–106 с.
 Хесс В. Радиационный пояс и магнитосфера– М.:Атомиздат, 1972. – 352 с.
 Boteler D.H., R. Pirjola, L. Trichtchenko On calculating the electric and magnetic fields produced in technological systems at the Earth's surface by a «wide» electrojet // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2000. V. 62. P. 1311-1315.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С ИСКУССТВЕННЫМ ИНТЕЛЛЕКТОМ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ АНОМАЛИЙ ГЕОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ, ПРЕДШЕСТВУЮЩИХ СИЛЬНЫМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМ НА КАМЧАТКЕ USING INFORMATION SYSTEM WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE TO DETECT ANOMALIES GEOACOUSTIC EMISSION PRIOR TO STRONG EARTHQUAKES IN CAMCHATKA

Ю.В.Марапулец, А.В.Шадрин

Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН

Since 1999, Kamchatka is conducting research of high-frequency geoacoustic emission in the frequency range 0.1 Hz ... 10 kHz sonar sensors installed in small reservoirs. The results showed that during the observation period, the majority of seismic events with energy class $K_s > 11$, located generally within a radius of 250 km have been recorded acoustic anomalies recorded in the daily time interval before the earthquake. The effectiveness of the acoustic response depends on the energy of the earthquake, its removal, depth and spatial location. Analysis of the recorded data is laborious, but anomalies of geoacoustic emission before earthquakes, the sensors record the signals caused by meteorological and anthropogenic factors. Examining the characteristics of the emission signals of different nature, was built information system using

Kohonen neural network. It allowed to identify and project the anomalies geoacoustic emission of neural map, and divide them into clusters of different nature.

Землетрясения – это одни из наиболее страшных природных катастроф, уносящие десятки и сотни тысяч человеческих жизней и вызывающие разрушения на огромных пространствах. И хотя землетрясение возникает внезапно, в настоящее время научно доказанным является факт, что необходимо некоторое конечное время для накопления энергии разрывов пород в его очаге [1, 2]. Таким образом, появляется возможность оперативно предупреждать о готовящемся сейсмическом событии.

Одним из перспективных направлений исследований с целью выявления аномалий, предшествующих землетрясениям, является регистрация и анализ возмущений геоакустической эмиссии. Данное явление обусловлено деформационными процессами, распространяющимися из очагов будущих землетрясений, которые приводят к образованию зон поверхностной дилатансии [3, 4]. Анализ подобных зон показывает, что в них до процесса лавинообразного разрушения породы (землетрясения), образуются трещины и микроподвижки, которые могут являться источниками геоакустических сигналов.

Исследования геоакустической эмиссии производятся гидрофонами, ориентированными по сторонам света и установленными в небольших водоемах на Камчатке [5, 6]. Диапазон исследуемых частот от 0.1 Гц до 10 кГц (используются частотные поддиапазоны 0.1–10 Гц, 10–50 Гц, 50–200 Гц, 200–700 Гц, 700–1500 Гц, 1500–6000 Гц, 6000–10000 Гц.). Далее сигналы накапливаются за 4 секунды и записываются на жесткий диск ЭВМ. Анализ данных показал, что в период 2001 – 2004 г.г. из 74 землетрясений с магнитудой $M > 4$, произошедших на эпицентральной расстоянии до 250 км от пунктов наблюдений, 34 предварялись в суточном временном интервале сильным увеличением уровня геоакустической эмиссии в килогерцовом диапазоне [5, 6]. Установлено, что амплитуда возмущений эмиссии зависит от магнитуды землетрясения и местоположения его эпицентра. Кроме возмущений геоакустической природы, системы регистрируют сигналы, обусловленные плохой погодой, в первую очередь действием осадков и сильного ветра. Частотный диапазон таких воздействий также составляет сотни герц - единицы килогерц и близок к диапазону возмущений перед землетрясениями. В связи с этим, для детального исследования поведения геоакустической эмиссии перед сейсмическими событиями, а также ее выявления на фоне погодных аномалий возникла необходимость в информационной системе распознавания геоакустических возмущений.

Анализ данных показал, что сигнал каждого частотного поддиапазона можно представить в виде элементарных воздействий длительностью 80 сек (20 накопленных за 4 с отсчетов) [7]. Поддиапазоны 0.1–10 и 10–50 Гц исключены из дальнейшей обработки для задач распознавания, т.к. предназначены для наблюдения за сейсмическим и высокочастотным сейсмическим шумом и не используются при анализе высокочастотных возмущений геоакустической эмиссии. Таким образом, на вход информационной системы должен подаваться составной сигнал, состоящий из пяти элементарных длительностью 80 секунд.

Исследование сигналов, регистрируемых датчиками, показало, что их можно разделить на следующие группы: возмущения перед сейсмическими событиями; аномалии, вызванные дождем, ветром и другими природными или техногенными источниками; спокойное (фоновое) состояние.

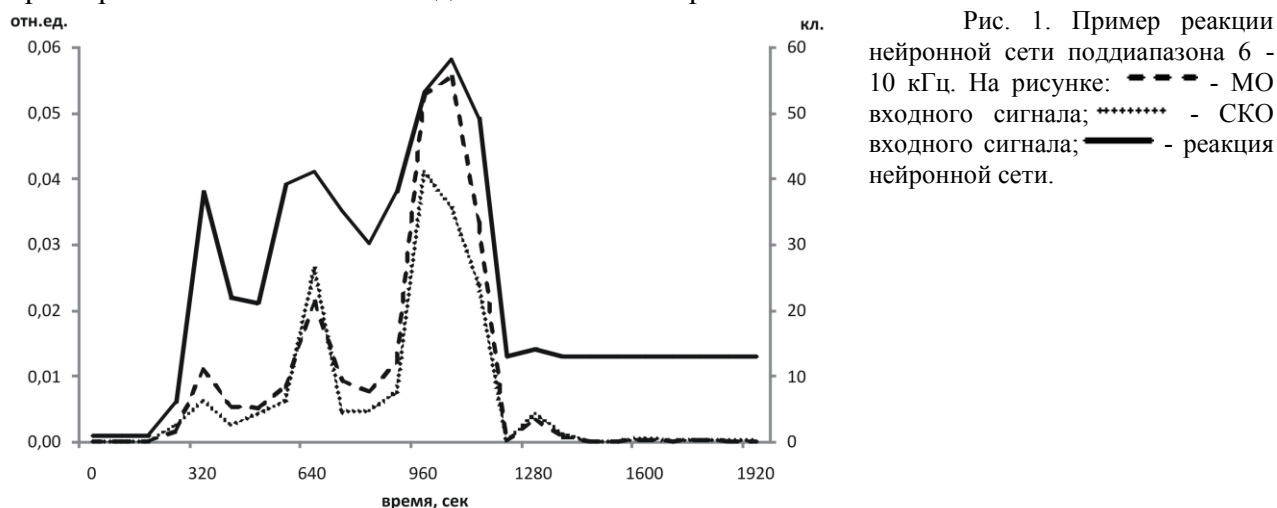
Как указано ранее, на вход информационной системы будет подаваться пять сигналов длительностью 20 отсчетов. При распознавании необходимо в каждом из сигналов обнаруживать наличие или отсутствие возмущений и в зависимости от значений среднеквадратического отклонения (СКО) и математического ожидания (МО) назначать им различные группы. Таким образом, поставленная задача сводится к классификации и кластеризации образов. Одним из популярных и распространенных инструментов,

способных ее решить, являются нейронные сети. Наиболее подходящая архитектура нейронной сети, обладающая способностью классификации и кластеризации без учителя - карты Кохонена [9]. Именно на нее и пал выбор при создании информационной системы [7].

Разобьем задачу распознавания на несколько этапов (уровней). На первом построим для каждого из пяти сигналов, подаваемых на вход системы, карту Кохонена, которая сможет разбить входные воздействия на определенные классы [7, 10]. Обучим сеть таким образом, чтобы во время изменения МО и СКО сигнала происходила смена и ее классов. В результате, на выходе первого уровня получим набор классов для каждого из пяти частотных поддиапазонов. В зависимости от характера исходного сигнала (возмущение перед землетрясением, ветер, дождь и т.п.), набор классов будет меняться. На втором уровне необходимо сконструировать новую сеть, которая будет способна анализировать значения классов с нейронных сетей поддиапазонов и принимать итоговое решение о характере исходного сигнала.

Перед синтезом нейронных сетей первого уровня необходимо подготовить обучающие выборки по 5-ти поддиапазнам, которые должны содержать эталонные сигналы возмущений. После обучения на них сеть будет определять подобные возмущения в сигнале, и соотносить их к определенному классу. Анализ элементарных возмущений показывает, что их значительное разнообразие (двенадцать основных форм, которые чередуются в различном порядке в том или ином поддиапазоне) создает определенные сложности для формирования эталонной обучающей выборки. В этом случае целесообразнее использовать генератор сигналов, способный создавать для обучения нейронных сетей воздействия с характеристиками, аналогичными «реальным».

Для реализации первого уровня системы распознавания была использована двумерная карта Кохонена размерностью $[4 \times 15]$, которая позволяет разделить входной сигнал на 60 классов. Эта размерность была получена с использованием критерия, позволяющего оценить качество кластеризации обученной сети, благодаря свойству кластеризации многомерных данных карты получили широкую популярность. Этот критерий (ККВ), имеет значение количества кластеров, в которые попадает обучающая выборка при разбиении карты на максимально возможное число кластеров. Используя этот параметр, получаем сеть, способную наилучшим образом выявлять внутренние характеристики сигналов и объединять их в кластеры.



После обучения нейронные сети, созданные на каждый поддиапазон, успешно разделили сигналы на классы. Для примера на рис. 1 показаны МО, СКО входного сигнала с геоакустическим возмущением для частотного поддиапазона 6–10 кГц и соответствующие классы нейронной сети после распознавания. На рисунке на левой шкале показаны значения МО и СКО сигналов, на правой шкале - значения классов нейронной сети.

Анализ данных показал, что на каждый из основных видов сигналов, регистрируемых системой, нейронная сеть первого уровня вырабатывает принципиально разные классы решений, что позволяет выделять возмущения различных типов.

На втором уровне системы распознавания необходимо производить анализ выработанных решений первичными нейронными сетями каждого поддиапазона и давать итоговый ответ о наличии того или иного типа возмущения. Для этого реализована карта Кохонена с размерностью $[12 \times 14]$, имеющая пять входов, для получения оптимальной архитектуры, использовалась методика максимализации ККВ. На рис. 2 слева изображена унифицированная матрица расстояний этой сети после обучения, отражающая близость нейронов между собой (чем темнее цвет, тем больше расстояние между нейронами) [11]. Справа контурами показаны кластеры, из которых состоит карта.

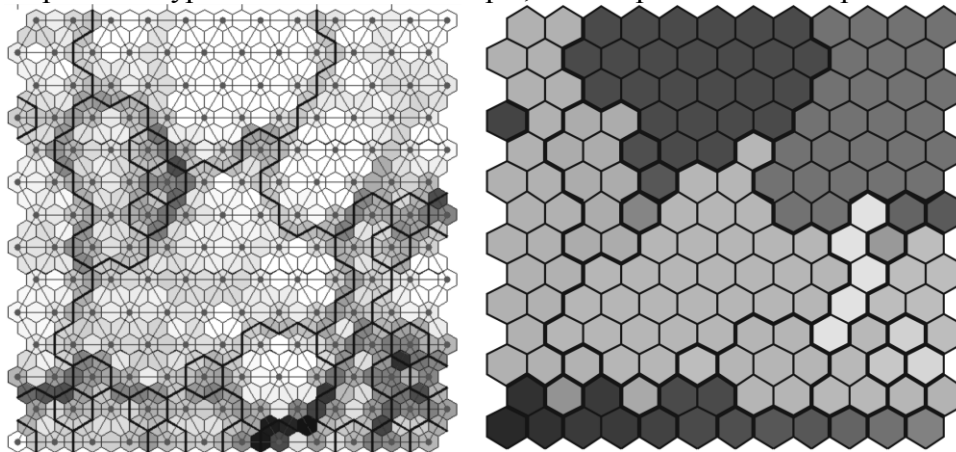


Рис. 2. Карта Кохонена с нанесением кластеров. Точками в центре шестиугольников на левом рисунке изображены нейроны сети.

С учетом вышесказанного, модель M системы можно представить следующим выражением:

$$M = \operatorname{argmin}(d(W^2(\omega_{ij})_{168 \times 5}, Y(y_{ij})_{5 \times 1})), y_i = \operatorname{argmin}(d(W_i^1(w_{kj})_{60 \times 20}, X^i(x_{kj}^i)_{20 \times 1}))$$

где W^2 - матрица весовых коэффициентов нейронной сети второго уровня; y_i - ответ нейронной сети первого уровня каждого поддиапазона; W_i^1 - матрица весовых коэффициентов нейронной сети первого уровня каждого поддиапазона; X^i - нормализованная матрица элементарного сигнала каждого поддиапазона; $d(X, Y)$ - функция, вычисляющая евклидово расстояние между двумя многомерными матрицами; argmin - функция, вычисляющая минимальный элемент в одномерной матрице.

Для оценки качества обучения нейронных сетей в разработанной информационной системе воспользуемся методиками, предложенными в [12-14]. Это качественная (средняя ошибка квантования) и количественная (топографическая ошибка) оценки. Качественная показывает способность нейронной сети раскрывать скрытую структуру и кластеризовать данные. Данная оценка может быть применена как мера разрешающей способности карты. Количественная оценка позволяет определить непрерывность отображения входных векторов на пространстве карты. Она измеряет пропорцию всех векторов данных, для которых первый и второй нейроны победители - несмежные. Чем меньше эта ошибка, тем лучше карта сохраняет топологию. Из [13, 14] следует, что нейронную сеть можно считать «качественно» обученной, если ошибка квантования не превышает 0.4, а ошибка топологии - 0.1. Карты Кохонена на первом и втором уровне информационной системы были обучены с учетом соответствия этим требованиям.

На рис. 3 показан пример работы информационной системы распознавания геоакустических возмущений. На ее вход подается сигнал, состоящий из аномалий вызванных дождем (участок 1 на рис. 3), ветром (участок 2) и возмущение эмиссии перед землетрясением (участок 3).

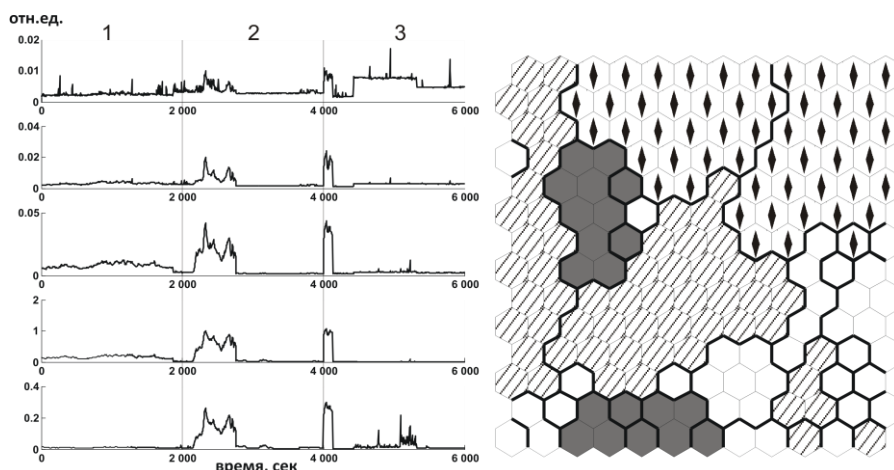


Рис. 3. Пример работы информационной системы.

На левой части рис. 3 показан входной сигнал, расфигурованный по пяти частотным поддиапазонам. Справа - реакция нейронной сети второго уровня системы. Серым цветом окрашены кластеры, в которые проецируется сигнал, вызванный дождем, в заштрихованные - ветром, с ромбами в центре - возмущение перед землетрясением. Белым цветом изображены кластеры, которые не приняли участие в анализе входного сигнала. Из рис. 3 видно, что разработанная информационная система разделяет сигналы различных видов в группы кластеров, которые не пересекаются. Это говорит о том, что система позволяет принимать правильные решения о типах возмущений.

Литература

1. Дж. Райс. Механика очага землетрясений. М.: Мир. 1982. 217 с.
2. А. Г. Соболев, А. В. Пономарев. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука. 2003. 270с.
3. Добровольский И.П., Зубков С.И., Мячкин В.И. Об оценке размеров зоны проявления предвестников землетрясений. Моделирование предвестников землетрясений. М.: Наука. 1980. С. 7–44.
4. Алексеев А. С., Белоносов А. С., Петренко В. Е. О концепции многодисциплинарного прогноза землетрясений с использованием интегрального предвестника. // Вычислительная сейсмология. 2001. Вып. 32. С. 81-97.
5. А. В. Купцов, Ю. В. Марапулец, Б. М. Шевцов. Анализ изменений геоакустической эмиссии в процессе подготовки сильных землетрясений на Камчатке. // Исследовано в России. 2004. 262. С. 2809-2818. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/262.pdf>
6. Купцов А.В., Ларионов И.А., Шевцов Б.М. Особенности геоакустической эмиссии при подготовке камчатских землетрясений. // Вулканология и сейсмология. 2005. № 5. С.45-59.
7. А. В. Купцов, И. А. Ларионов, Ю. В. Марапулец, М. А. Мищенко, А. В. Шадрин, А. О. Щербина. Применение нейронных сетей для оценки возмущений геоакустической эмиссии на заключительной стадии подготовки землетрясений на Камчатке. // Сборник трудов IX Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SKM'2006). – С.-Петербург. 2006. т.1. С.238-240.
8. Ю. В. Марапулец, М. А. Мищенко, А. В. Шадрин. Реакция нейронной сети на изменение параметров модели геоакустического сигнала. // Сборник трудов XI Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SKM'2008). – С.-Петербург. 2008. т.1. С.250-252.
9. Т. Kohonen. Self-Organizing Maps. Springer, Berlin, 2001.
10. 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 трудов X Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SKM'2007). – С.-Петербург. 2007. т.1. С.290-292.
11. A. Ultsch and H.P. Siemon. Kohonen's self organizing feature maps for exploratory data analysis. In Proc. INNC'90, Int. Neural Network Conf., pages 305-308, Dordrecht, Netherlands, 1990. Kluwer.
12. J. Schatzmann. Using Self-Organizing Maps to Visualise Clusters and Trends in Multidimensional Datasets BEng thesis, Imperial College, June 19, 2003 (pdf, <http://mi.eng.cam.ac.uk/~js532/papers/schatzmann03soms.pdf>)
13. Vesanto, J., Data Exploration Process Based on the Self-Organizing Map, Acta Polytechnica Scandinavica, Mathematics and Computing Series No. 115, Espoo 2002, 96 pp. Published by the Finnish Academies of Technology.
14. Arsuaga Uriarte, F. Diaz Martin "Topology Preservation in SOM" PWASET vol. 15, 187-191 (october 2006).

АВТОМАТИЗАЦИЯ СБОРА, ХРАНЕНИЯ И АНАЛИЗА ДАННЫХ С АВТОНОМНЫХ СТАНЦИЙ ГЕОАКУСТИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ **AUTOMATIZATION OF ACQUISITION, STORAGE AND ANALYSIS OF THE DATA FROM SELF-CONTAINED SITES OF GEOACOUSTIC OBSERVATIONS**

А.Е. Москвитин, И.А. Ларионов

Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, ikir@ikir.ru

In the work of the self-contained sites of IKIR FEB RAS there is a problem of data integrity retention and of real-time monitoring of the registration system state. In order to solve it a specialized software complex was developed; it works on client-server principle. Automatization system allows us to realize centralized data acquisition and monitoring of remote sites current state. Simultaneously with the data acquisition, on the base of the server of the Acoustic Researches Laboratory of IKIR a cloud system was organized, which gives a remote access to the collected data and allows us to make its processing and analysis. Having only one powerful PC, this approach gives all the laboratory staff an opportunity to use all the computer resources. The system uses AltLinux platform and is totally free. At present the system automatically collects, stores and analysis geoacoustic data from the three remote sites: "Karymshina", "Paratunka" and "Mikizha".

При организации удаленных пунктов геофизических наблюдений существует проблема сохранения целостности данных, оперативного контроля состояния систем регистрации, удаленного администрирования и управления аппаратурой, а также организации централизованного хранения данных и безопасности системы доступа к полученной информации. Эта задача решена в лаборатории акустических исследований ИКИР ДВО РАН, где был разработан специализированный комплекс программ, позволяющий осуществлять централизованный сбор данных и мониторинг текущего состояния удаленных станций.

Измерения геофизических полей, производимые лабораторией акустики, проводятся на трех удаленных пунктах наблюдений: «Карымшина», «Паратунка» и «Микижа». Для связи с экспедиционными пунктами была построена сеть RadioEthernet с вышками и направленными антеннами. Связь осуществляется на частоте 2.4 МГц. Общая протяженность сети более 20 км. Каждая обсерватория и каждый экспедиционный пункт снабжен GPS-системой серверов времени, т.к. все геофизические измерения ведутся с точной привязкой к мировому времени. Это позволяет, кроме того, проводить синхронные эксперименты различных обсерваторий с высокой точностью[1].

Для поддержания оборудования в работоспособном состоянии и исключения потерь данных, разработанный автоматизированный программный комплекс был установлен на сервере лаборатории, который является единым центром хранения собираемых данных. Для снижения финансовых затрат на оборудование и программное обеспечение, сервер был создан по архитектуре клиент-сервер на платформе AltLinux (рис. 1).

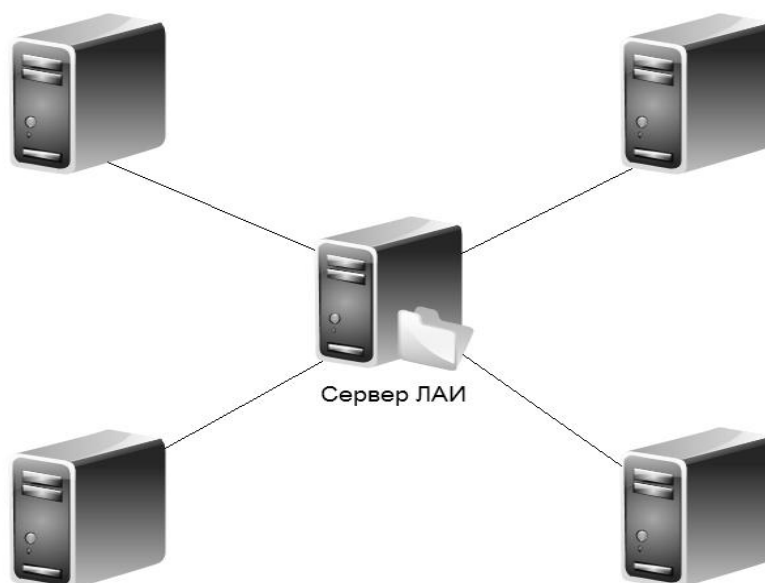


Рис.1 Схема многопользовательской системы.

Данная система позволяет всем сотрудникам лаборатории одновременно получать доступ к необходимым данным и использовать вычислительные мощности сервера, т.к. все ресурсоемкие

операции производятся на нем, а компьютеры сотрудников служат только для отображения результатов. Это позволяет существенно экономить на обновлении оборудования и использовании общего программного обеспечения, т.к. при необходимости увеличения вычислительной мощности необходимо модернизировать только один компьютер, а также существует возможность объединение в облачную систему серверов других лабораторий.

Одной из функций разработанного автоматизированного программного комплекса по сбору и мониторингу данных является ежесуточный запуск в заданное время, копирования файлов с геофизическими данными с удаленных компьютеров под управлением операционных систем как Linux, так и Windows по различным протоколам. Т.к. связь между станциями и институтом осуществляется по средствам радиомодемов, то из-за нестабильной связи не всегда представлялось возможным получить необходимые данные. На рис. 2 показан фрагмент сети института, обрабатывающий акустические измерения на экспедиционных пунктах. Программа пытается подключить удаленный ресурс и если подключение прошло успешно, то происходит синхронизация данных между сервером и удаленным компьютером. Если во время подключения или синхронизации происходит ошибка или обрыв связи, программа повторит свою попытку через заданный промежуток времени. Если через заданное число попыток ей так и не удалось синхронизировать данные или произошел сбой оборудования на станции наблюдений, на заданный электронный адрес или посредством SMS сообщения оператору будет отправлено сообщение с ошибкой, так же ошибка будет записана в лог файл. Все данные собираются на сервере, к которому имеют доступ все сотрудники лаборатории. Данное программное обеспечение позволило автоматизировать процесс получения новых данных со станций и сократить возможность потери информации.

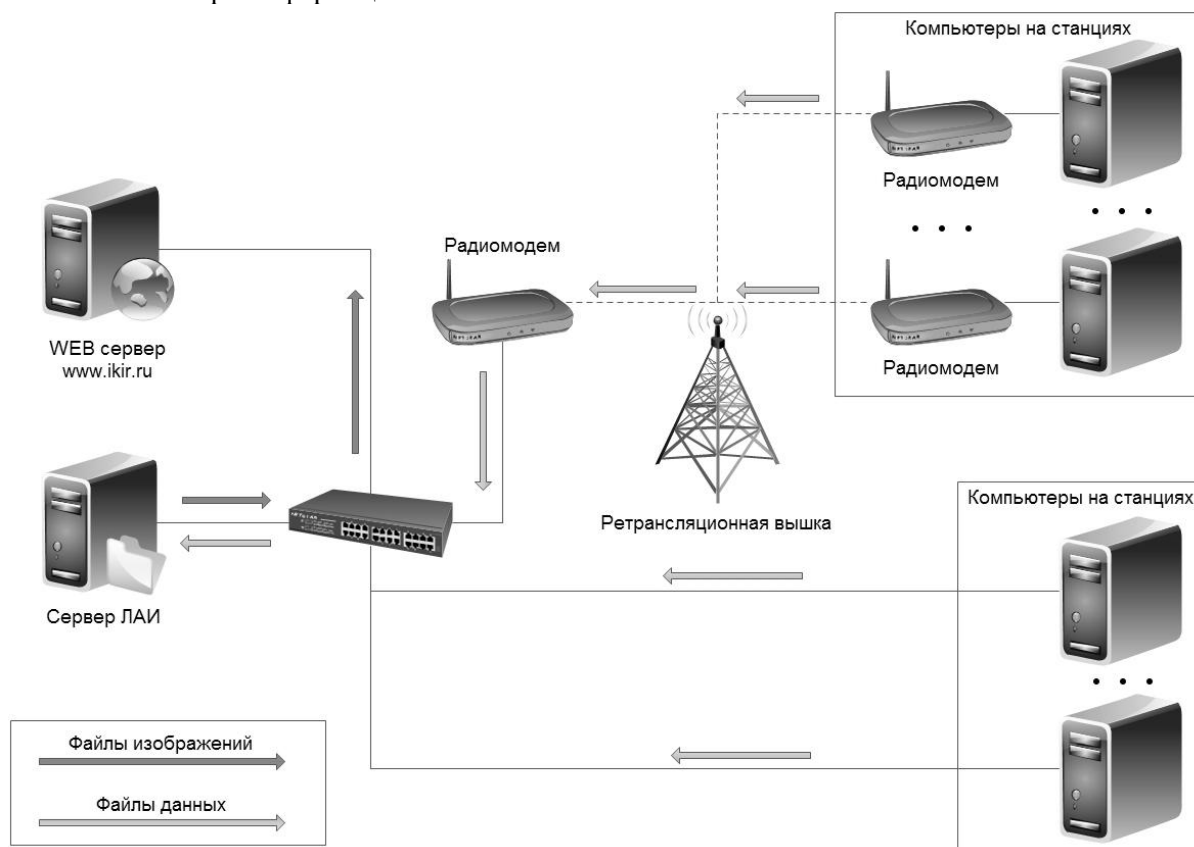


Рис.2 Фрагмент сети обработки данных экспедиционных пунктов на Камчатке.

Для мониторинга текущего состояния удаленных станций был разработан комплекс программ, работающий по принципу клиент-сервер. Серверная часть программы установлена на удаленных компьютерах. Клиентская часть программы установлена на сервере лаборатории. Через заданный промежуток времени, клиентская часть программы отправляет запрос программе-серверу, которая в свою очередь делает снимок экрана и отправляет этот снимок программе-клиенту. После получения снимков с наблюдаемых комплексов, клиентская программа выводит их на экран. Для оперативного реагирования на изменения в работе и отображения текущего состояния станций, в лаборатории был установлен большой монитор, выполняющий роль

оперативного табло (рис. 3). Это позволяет ускорить устранение программных ошибок или сбоев аппаратуры, произошедшие на удаленных компьютерах, что, в свою очередь, позволяет избежать потери геофизических данных.

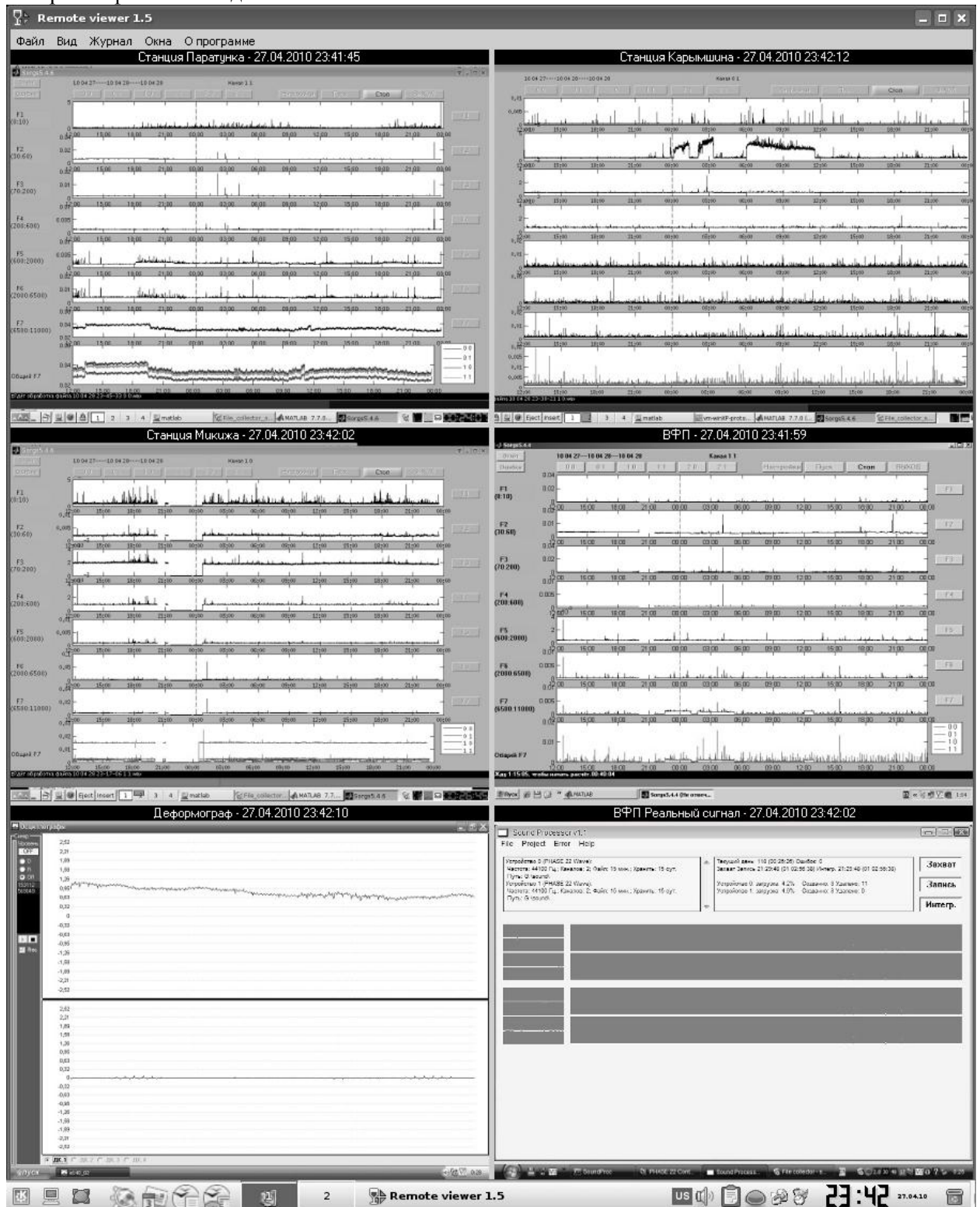


Рис.3 Образ экрана программы мониторинга.

Дальнейшая модернизация программного обеспечения направлена на создание web-интерфейса, что позволит следить за состоянием удаленных станций не только в лаборатории акустических исследований, но и посредством Интернет из любой точки мира.

На сегодняшний день информация по измерениям геоакустической эмиссии на всех пунктах наблюдений доступна в сети Интернет, с задержкой в одни сутки. На рис. 4 показан пример графического файла для станции Карымшина.

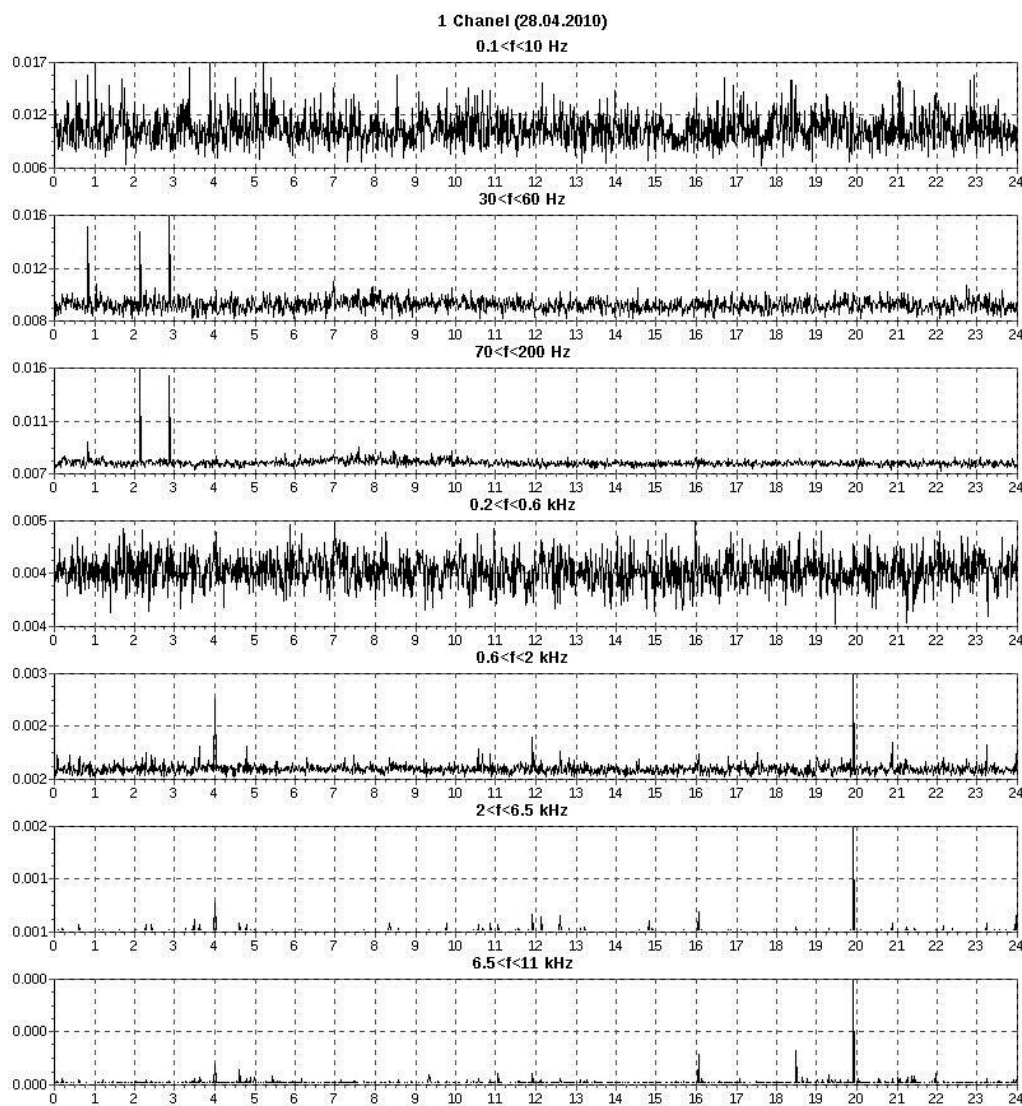


Рис. 4 График геоакустической эмиссии в семи частотных диапазонах на станции Карымшина.

Для отображения информации в сети Интернет было разработано специальное программное обеспечение, которое раз в сутки в заданное время производит анализ файлов на наличие новых данных, и в случае их появления, программа считывает данные из текстового файла и переводит их в графический вид. В результате получается графический файл, который отображается на web-сайте института.

Посмотреть как это выглядит в Интернете можно по следующим ссылкам[2]:

1. Для станции Микижа: <http://ru.www.ikir.ru/Data/Ira/mikizha.html>
2. Для станции Паратунка: <http://ru.www.ikir.ru/Data/Ira/paratunka.html>
3. Для станции Карымшина: <http://ru.www.ikir.ru/Data/Ira/karymshina.html>

Таким образом, проведен комплекс мероприятий по организации работы сотрудников лаборатории в едином информационном пространстве, разработано программное обеспечение, позволившее автоматизировать процесс контроля и сбора информации с удаленных пунктов наблюдений и сократившее потери получаемых данных о наблюдаемых геофизических полях.

Литература

1. Смирнов С.Э., Иванов А.В., Москвитин А.Е. Представление в сети Интернет данных геофизического мониторинга, проводимого ИКИР. // Тез. докл. научно-технической конференции Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России 11-17 октября 2009 г. Петропавловск-Камчатский, С. 122
2. Smirnov S.E., Ivanov A.V., Moskvitin A. E. Internet presentation of the data of cosmophysical monitoring in Far East of Russia. // Materials of the International Conference "Electronic Geophysical Year: State of the Art and Results", June 3-6, 2009, Pereslavl-Zalessky / edited by V. Nechitailenko. - GC RAS, Moscow, 2009, doi:10.2205/2009-REGYconf, P. 26-27.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРАВЛЕННОСТИ ГЕОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ НА ПУНКТЕ "МИКИЖА" (КАМЧАТКА) В ПЕРИОД 2004 - 2009 Г.Г. RESULTS OF INVESTIGATION OF GEOACOUSTIC EMISSION DIRECTION ON "MIKIZHA" STATION (KAMCHATKA) IN 2004 – 2009

А.О. Щербина, Ю.В. Марапулец

Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН
Investigation of the direction of geoacoustic radiation was carried out at "Mikizha" site by a receiving system which allows us to define the direction of acoustic wave energy arrival and to analyze the character of particle motion of a medium by vector-phase methods. A combination vector receiver is used as an acoustic receiving device. A method for automatization of detection, high-precision determination of the direction to the radiation source and analysis of geoacoustic pulse flow is developed; it was realized in a hardware-software complex. During the evaluation of acoustic radiation direction the notions of integral and differential geoacoustic activity were used. The first value is pulse repetition rate depending on time. The second one is directional distribution of pulse repetition rate. Investigation of geoacoustic emission direction were carried out both in calm periods, when there were no deformation and meteorological disturbances, and in the periods of increase of the emission level in a daily interval before seismic events. In the result it was established that during the increase of emission intensity by more than one order clearly defined maximums appear in the direction of longitudinal oscillations. Using their direction we can evaluate the orientation of the axis of rock maximum compression near the observation site.

Проводимые на Камчатском геофизическом полигоне исследования показывают, что в пределах суток перед некоторыми сильными сейсмическими событиями наблюдается заметный рост интенсивности геоакустической эмиссии и изменение ее направленных свойств. Этот акустический эффект наиболее ярко проявляется в килогерцовом диапазоне частот и определяется деформациями приповерхностных пород в пунктах наблюдений на удалении первых сотен километров от эпицентров готовящихся землетрясений [1, 2].

Поскольку прочность пород по отношению к касательным напряжениям меньше, чем к сжатию, то в месте наблюдения преобладают сдвиговые источники акустической эмиссии. В работах [3] показано, что ориентация источников такого типа обусловлена направлением максимальных касательных напряжений, ориентированных преимущественно под углом 45° к оси наибольшего сжатия. При этом максимумы продольных акустических колебаний приходятся на направления, перпендикулярные этой оси для волны сжатия и совпадающие с ней для волны разряжения. Как правило, волна сжатия по интенсивности больше волны разряжения, что связано с особенностями процессов разрушения пород и диссипации энергии. Диаграмма направленности поперечных колебаний повернута на 45° относительно диаграммы направленности продольных волн (рис. 1).

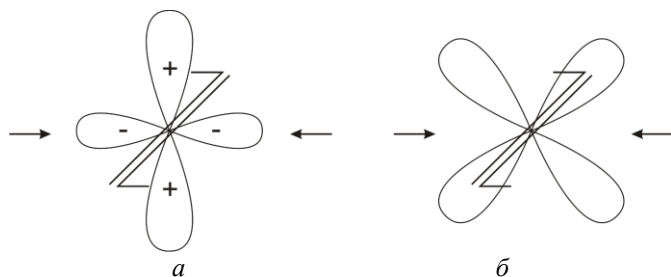


Рис. 1. Диаграммы направленности продольных (а) и поперечных (б) акустических колебаний сдвиговых источников. Стрелками отмечена ось наибольшего сжатия.

В экспериментах, проводимых на Камчатке с целью исследования данного эффекта, использовался комбинированный приемник производства ЗАО «Геоакустика» при ФГУП ВНИИФТРИ, представляющий собой сферическое тело диаметром 5 см с нейтральной плавучестью в водной среде. Прибор установлен на озере Микижа в полуметре от дна [4]. Горизонтальные размеры данного водоема 200x700 м, глубина не превышает 5 м. Вследствие многократных отражений сигнала от поверхности водоема и его дна,

существенно осложняющих процесс определения направления на его источник, для изучения геоакустической эмиссии использовались только два горизонтальных векторных канала, а обработка результатов проводилась для горизонтальной плоскости. Установка приемника в воде, где поперечные колебания сильно затухают, существенно облегчает задачу исследования направленности эмиссии, так как позволяет ограничиться исследованием только продольных волн.

В работе [1] показано, что источниками возмущений приповерхностной высокочастотной геоакустической эмиссии являются деформационные подвижки, относительные смещения которых $10^{-7} - 10^{-6}$. Скорость V_r смещения в подвижках создающих акустическую эмиссию примерно равна скорости поперечных колебаний V_s [3]. Подвижки с меньшими скоростями смещений излучают акустические колебания с меньшей эффективностью, поэтому их можно не рассматривать. В осадочных породах скорость продольных колебаний $V_p \approx 1.8-2.5$ км/с [5], а отношение $V_p / V_s \approx 1.73$ [6], что дает $V_r \approx 1-1.5$ км/с. Размеры $l = V_r/f$ источников геоакустической эмиссии, излучающих в диапазоне частот $f = 1-18$ кГц, находятся в интервале $l \approx 0.05-1.5$ м.

Согласно наблюдаемому времени затухания импульсов $0.01 - 0.015$ с и скорости продольных колебаний в осадочных породах $V_p \approx 1.8-2.5$ км/с расстояние ослабления сигнала находится как произведение этих величин и составляет от 18 до 37 м. Это расстояние соответствует размеру области, в пределах которой находятся источники акустических сигналов, регистрируемых приемником в килогерцовом диапазоне (рис. 2). При этом коэффициент ослабления сигнала (его амплитуды в e раз) равен обратной величине соответствующего расстояния $0.03 - 0.06$ м $^{-1}$, а при пересчете неперов в децибелы получается $230 - 480$ дБ/км, что характерно для осадочных пород [7].



Рис. 2. Схема проведения эксперимента по изучению направленных свойств геоакустического сигнала. Приведено вертикальное сечение через точку установки приемника. Штриховкой отмечены области генерации, из которых может осуществляться прием геоакустического сигнала.

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 по направлениям в точке приема будет соответствовать примеру, приведенному на рис.3,а.

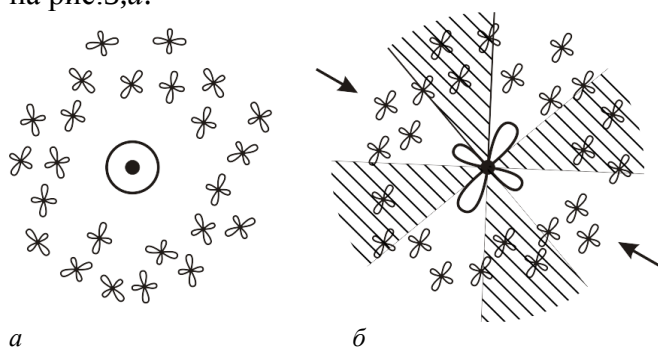


Рис. 3. Примеры диаграмм распределения интенсивности геоакустического излучения по направлениям в точке приема акустического сигнала сдвиговых источников при отсутствии деформационных возмущений (а), при их наличии (б). На рисунках толстой линией обозначены диаграммы распределения интенсивности геоакустического излучения по направлениям в точках приема, штриховкой — зоны расположения источников, не излучающих сигнал в направлении приемника. Стрелками отмечена ось наибольшего сжатия.

Увеличение напряжений, например, при подготовке землетрясений, приведет к появлению в зоне геоакустической эмиссии достаточно большого числа одинаково ориентированных сдвиговых источников (рис. 3,б). 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 интенсивности геоакустического излучения по направлениям в точке приема регистрируемого геоакустического сигнала может приобрести значительную асимметрию.

Таким образом, анализ азимутального распределения 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 единый шумоподобный сигнал. Если первая и вторая составляющие шума достаточно постоянны, 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.

Для автоматизации процесса обнаружения и определения направления на источник излучения геоакустических импульсов разработан программно-вычислительный комплекс [8]. При рассмотрении результатов использовались понятия геоакустической активности $\Omega(t)$ и ее азимутального распределения $D(\alpha, t)$. Первая из этих величин представляет собой зависящую от времени частоту следования импульсов в определенном интервале амплитуд, а вторая – азимутальное распределение геоакустической активности.

Исследования направленности геоакустической эмиссии проводились, как в спокойные (фоновые) периоды, когда отсутствовали деформационные и метеорологические возмущения, так и в периоды перед землетрясениями. Непрерывные наблюдения, проведенные с августа 2007 г. по декабрь 2009 г., позволили определить, что в фоновые периоды диаграмма азимутального распределения геоакустической активности достаточно равномерна, а частота следования импульсов плавно изменяется в пределах от 0.1 до 1.2 в секунду (рис. 4). Причем данное изменение носит явный сезонный характер, так как, максимум всегда наблюдался осенью, а минимум – весной.

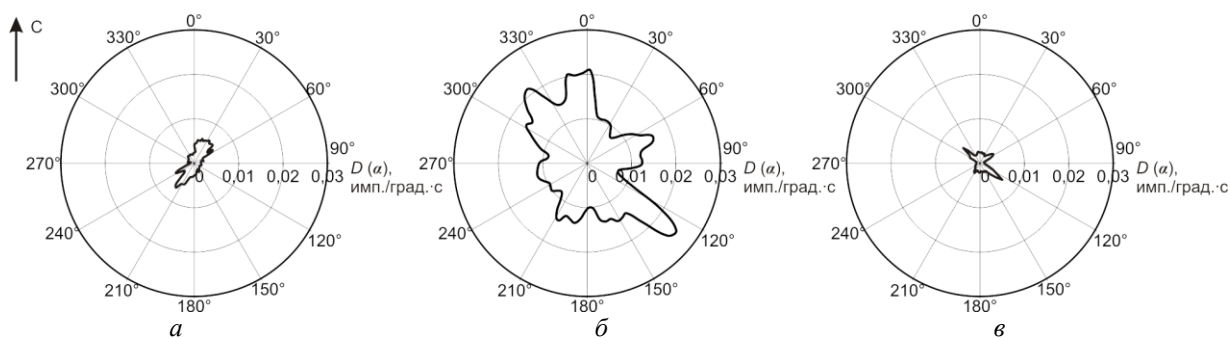


Рис. 4. Азимутальное распределение геоакустической активности $D(\alpha)$ (имп./град.·с), соответствующее фоновому периоду весны 2004 г. (а), зимы 2007-2008 гг. (б) и весны-лета 2008 г (в).

На фоне плавных сезонных изменений возникают кратковременные (в течение суток) интенсивные возмущения геоакустической эмиссии, связанные с деформационной активностью (рис. 5). В отличие от фона, периоды возмущений характеризуются заметным повышением уровня геоакустической эмиссии под действием деформационных возмущений, которые достаточно часто наблюдаются в преддверии некоторых сейсмических событий. Из приведенных 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.

Рассмотрим подробнее особенности формирования диаграммы распределения интенсивности геоакустического излучения по направлениям на примере случая, зарегистрированного 10.11.2004 (рис. 5,а) перед землетрясением, произошедшим в тот же день. 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 преимущественно состоит из волн сжатия. Таким образом, ось наибольшего сжатия в породах, ориентированная перпендикулярно основным направлениям прихода акустического сигнала, наклонена под углом около 120 градусов.

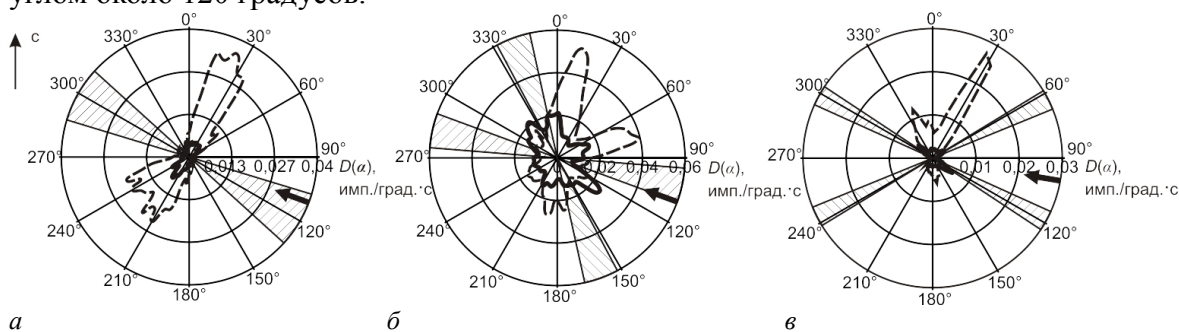


Рис. 5. Азимутальное распределение геоакустической активности в периоды возмущений (штриховая линия) 10.11.2004 (а), 14.12.2007 (б) и 14.05.2008 (в). Сплошной линией показан фоновый уровень эмиссии в соответствующие периоды, заштрихованные области – оценка ориентации оси наибольшего сжатия, стрелочками показаны азимуты землетрясений

Диаграммы распределения интенсивности геоакустического излучения по направлениям, приведенные на рис. 5,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.

Таким образом, установленная на дне озера «Микижа» приемная система на базе комбинированного приемника может использоваться для оценки ориентации осей наибольшего сжатия в моменты деформационных возмущений.

Литература

1. Долгих Г.И., Купцов А.В., Ларионов И.А., Марапулец Ю.В., Швец В.А., Шевцов Б.М., Широков О.Н., Чупин В.А., Яковенко С.В. Деформационные и акустические предвестники землетрясений. // ДАН, 2007, Т.413, №5. С.96-100.
2. Пережогин А.С., Шевцов Б.М., Сагитова Р.Н., Водинчар Г.М. Моделирование зон геоакустической эмиссии. // Математическое моделирование. 2007. Т. 19. № 11. С. 59-64.
3. Виноградов С.Д., Кузнецова К.И., Москвина А.Г., Штейнберг В.В. Физическая природа разрыва и излучение сейсмических волн. Физические процессы в очагах землетрясений. М.: Наука, 1980, с.129-140.
4. Гордиенко В.А., Гордиенко Т.В., Купцов А.В., Ларионов И.А., Марапулец Ю.В., Рутенко А. Н., Шевцов Б. М. Геоакустическая локация областей подготовки землетрясений. // ДАН, 2006, Т.407, №5. С.669-672.
5. Аносов Г. И., Биккенина С. К., Попов А. А. и др. Глубинное сейсмическое зондирование Камчатки. М.: Наука. 1978. 130 с.
6. Славина Л.Б. Исследование по физике землетрясений. М.: Наука. 1976. С. 217-236.
7. Клей К., Медвин Г. Акустическая океанография. М.: Мир. 1980. 580 с.
8. Марапулец Ю.В., Щербина А.О. // Техническая акустика. 2008. 14. <<http://www.ejta.org>>.