

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ КОСМОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН
ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИКИР ДВО РАН)

На правах рукописи

СОЛОДЧУК Александра Андреевна

**ПРЕД- И ПОСТСЕЙСМИЧЕСКИЙ ОТКЛИК
ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ГЕОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук
Марапулец Юрий Валентинович

с. Паратунка, Елизовский район, Камчатский край – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ: ДИАПАЗОНЫ ИЗМЕРЕНИЯ, СПОСОБЫ РЕГИСТРАЦИИ	10
1.1 Механизмы генерации акустической эмиссии.....	10
1.2 Диапазоны измерений и способы регистрации.....	14
1.3 Аномалии акустической эмиссии, связанные с землетрясениями.....	16
Выводы по главе 1	18
ГЛАВА 2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ГЕОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В ПУНКТЕ «МИКИЖА» НА КАМЧАТКЕ	20
2.1 Измерительный комплекс	20
2.2 Геоакустическая эмиссия в фоновые периоды и при активизации деформации	26
2.3 Характеристики суточного хода геоакустической эмиссии.....	33
Выводы по главе 2.....	42
ГЛАВА 3. НАПРАВЛЕННОСТЬ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ГЕОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА.....	44
3.1 Теоретические основы определения направления сигналов высокочастотной геоакустической эмиссии	45
3.2 Направленность высокочастотной геоакустической эмиссии в фоновые периоды и при активизации деформационных процессов.....	54
3.3 Анализ изменения направленности высокочастотной геоакустической эмиссии перед землетрясениями и при последующей релаксации напряжений.....	60
Выводы по главе 3	73
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	74
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	75
Приложение А. Характеристики землетрясений и аномалий направленности.....	83

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Твердые тела излучают упругие волны в ответ на динамическую перестройку их структуры. Это явление носит название – акустическая эмиссия (АЭ). Основным механизмом ее возникновения является движение дислокаций и их скоплений. Неравномерность и прерывистость дислокационных процессов определяет импульсный характер излучения. Акустическая эмиссия находит широкое применение в геофизике, в частности при исследовании напряженно-деформируемого состояния пород, и в различных областях промышленности.

Акустические колебания в геофизике рассматриваются в нескольких частотных диапазонах. Инфразвуковой (сейсмический) диапазон от долей до единиц герц используется для изучения сигналов землетрясений, мониторинга взрывов, в сейсморазведке. Колебания на частотах от единиц до десятков герц (высокочастотный сейсмический шум) применяются при изучении длиннопериодных деформационных процессов, предвестников сильных землетрясений, для поиска и разведки залежей полезных ископаемых. До недавнего времени этот частотный диапазон считался наиболее информативным с точки зрения исследования пластических процессов в природных средах. Но современные исследования показали эффективность использования колебаний звукового диапазона от нескольких единиц до первых десятков килогерц (высокочастотная геоакустическая эмиссия) для решения задач диагностирования природных сред. Акустическая эмиссия в ультразвуковом диапазоне частот (от десятков килогерц до десятков мегагерц) используется для исследования механизмов трещинообразования в образцах горных пород при их лабораторном деформировании. Также, колебания в этом диапазоне широко применяются в промышленности при неразрушающем контроле объектов.

Исследования геоакустической эмиссии (ГАЭ) в сейсмоактивных регионах показывают, что на стадии подготовки землетрясений в характере акустического излучения могут возникать ярко выраженные изменения, которые зачастую

наблюдаются в виде краткосрочного резкого повышения интенсивности эмиссии. Но необходимо учитывать, что в формирование структуры геоакустического сигнала определенный вклад вносят длиннопериодные деформационные процессы, например, собственные колебания Земли, лунно-солнечные приливы, волны от удаленных землетрясений, поэтому актуальным является изучение фоновых характеристик эмиссии, в частности ее периодических составляющих.

В результате исследований ГАЭ на Камчатке выявлены аномальные возмущения в виде непрерывного повышения или квазипериодических пульсаций в интенсивности излучения в килогерцовом диапазоне частот, возникающие за несколько суток до готовящегося землетрясения [Купцов, 2005]. Они обусловлены усилением деформирования пород в пункте наблюдений на удалении первых сотен километров от эпицентров готовящихся землетрясений [Деформационные и акустические предвестники ..., 2007]. В работе [Предварительные результаты ..., 2000] показано, что сильные удаленные землетрясения сопровождаются сильными сдвиговыми пред- и постсейсмическими деформациями. Согласно [Киссин, 2015] пред- и постсейсмические реакции геофизических полей тесно связаны между собой и обусловлены деформациями среды на различных стадиях сейсмического процесса. С учетом этого, аномальные возмущения в сигналах ГАЭ возможно будут наблюдаться также после землетрясений.

При подготовке землетрясений кроме аномальных изменений в интенсивности эмиссии наблюдаются ярко выраженные максимумы в ее направленности, обусловленные ориентацией источников излучения в поле напряжений пород [Шевцов и др., 2010]. Ранее при исследовании направленных свойств высокочастотной геоакустической эмиссии рассматривались ее особенности в фоновые (спокойные) периоды и во время деформационных возмущений, связанных с подготовкой удаленных землетрясений. Поскольку релаксация поля локальных напряжений в пункте наблюдений происходит еще некоторое время после землетрясений, актуальным является исследование характера направленности и после них.

Данная работа посвящена исследованию отклика высокочастотной геоакустической эмиссии на усиление и последующую релаксацию поля напряжений в пункте наблюдения, связанных с землетрясением.

Предмет исследования – высокочастотная геоакустическая эмиссия.

Целью работы является исследование отклика высокочастотной геоакустической эмиссии на подготовку землетрясений и последующую релаксацию остаточных напряжений в пункте наблюдений.

Задачи исследования:

1. Выполнить аналитический обзор современного состояния исследований в области акустической эмиссии.
2. Исследовать характеристики геоакустической эмиссии, в том числе периодические составляющие, в фоновые периоды и при активизации деформационных процессов.
3. Исследовать изменения направленности геоакустической эмиссии в условиях спокойной погоды перед готовящимися землетрясениями и после них.
4. Проанализировать статистику появления пред- и постсейсмических аномальных возмущений геоакустической эмиссии в 2008–2016 гг.

Научная новизна работы

Проведено исследование изменения направленности высокочастотного геоакустического излучения перед землетрясениями и при последующей релаксации полей локальных напряжений. Впервые в сейсмоактивном регионе обнаружены изменения азимутального распределения геоакустических импульсов не только перед землетрясениями, но и после них. Получена статистика появления пред- и постсейсмических аномалий в азимутальном распределении геоакустической эмиссии в 2008–2016 гг. Создана база данных направленности излучения в спокойные периоды и при активизации деформационных процессов, обусловленных землетрясениями. Обнаружена связь между суточными вариациями температуры воздуха и высокочастотной геоакустической эмиссии.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Установлено наличие ярко выраженных максимумов в направленности высокочастотного геоакустического излучения во время активизации деформационных процессов, обусловленных подготовкой землетрясений и последующей релаксацией остаточных напряжений в пункте наблюдений.
2. Выявлены статистические закономерности появления пред- и постсейсмических аномалий направленности высокочастотной геоакустической эмиссии, связанные с камчатскими землетрясениями в 2008–2016 гг.
3. Выявлена акустоэмиссионная составляющая с периодом 24 ч, обусловленная термдеформацией приповерхностных осадочных пород при суточных изменениях температуры.

Достоверность результатов обеспечивается надежностью использованной аппаратуры и её систематической калибровкой, большой длительностью наблюдений, качеством и представительным объемом экспериментальных данных, стандартными методиками обработки данных.

Обоснованность результатов подтверждается их согласованностью и непротиворечивостью результатам исследований, проводимых по смежной тематике; обеспечивается применением основных положений теории упругости, векторно-фазовых методов в акустике, современных методов сбора информации, статистических методов обработки и анализа данных.

Практическая ценность работы

Работа выполнена в соответствии с научными темами и планами работ Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИКИР ДВО РАН), Программами фундаментальных научных исследований Президиума РАН «Окружающая среда в условиях изменяющегося климата: экстремальные природные явления и катастрофы», проектом ОФН РАН № 12-I-ОФН-17, проектами ДВО РАН № 09-III-

А-02-043, № 12-III-A-07-107, фундаментальными исследованиями молодых ученых (до 35 лет включительно) № 10-III-B-02-021.

Результаты исследования могут быть использованы для развития акустических методов исследования природных сред, изучения характеристик деформационных процессов, создания методов локации областей повышенных напряжений и оценки уровня сейсмической опасности, в геофизике и гидроакустике.

Оригинальность разработанных автором программных продуктов подтверждена свидетельствами о регистрации электронного ресурса № 10029 от 21.02.2008 и № 19789 от 24.12.2013, свидетельствами о регистрации базы данных №2015620747 от 14.05.2015 и №2016621676 от 19.12.2016.

Результаты исследования суточной составляющей высокочастотной геоакустической эмиссии признаны одним из важнейших научных достижений, полученных Институтами, объединяемыми Научным советом по физике солнечно-земных связей (Совет «Солнце – Земля»), в 2016 г. в рамках государственного задания на проведение фундаментальных научных исследований.

Личный вклад

Автор работы выполнила анализ направленности геоакустических сигналов в периоды активизации деформационных процессов и оценила статистику изменчивости направленности акустического излучения. Участвовала в теоретическом обосновании наблюдаемых эффектов. Разработала методику и программное обеспечение для автоматизированного выделения суточных вариаций высокочастотной геоакустической эмиссии, а также исследовала суточную составляющую эмиссии. Принимала непосредственное участие в создании баз данных, содержащих сведения о характеристиках сигналов геоакустической эмиссии. Самостоятельно и вместе с соавторами участвовала в подготовке публикаций по теме работы.

Апробация работы

Результаты по теме диссертационной работы докладывались и обсуждались на семинарах ИКИР ДВО РАН, а также следующих научных мероприятиях:

- VI Региональной молодежной научной конференции «Исследования в области наук о Земле» (г. П.-Камчатский, 2008 г.);
- научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава и аспирантов КамчатГТУ «Научно-технические исследования в рыбохозяйственной отрасли Камчатского края» (г. П.-Камчатский, 2009 г.);
- межрегиональной научно-практической конференции «Наука, образование, инновации: пути развития» (г. П.-Камчатский, 2010 г.);
- 9th International Conference «Problems of Geocosmos» (St. Petersburg, Petrodvorets, 2012);
- VI и VII международных конференциях «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений» (с. Паратунка, 2013, 2016 гг.);
- XIII и XIV Конференциях молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом», проводимых в рамках Международной Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике (г. Иркутск, 2013, 2016 гг.);
- XX Всероссийской конференции с участием иностранных ученых «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли» (Новосибирск, 2013 г.);
- I Всероссийской акустической конференции (г. Москва, 2014 г.);
- VI Сахалинской молодежной научной школе «Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз» (г. Южно-Сахалинск, 2016 г.);
- XXII Международном симпозиуме «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (г. Томск, 2016 г.);
- XXV Всероссийской открытой научной конференции «Распространение радиоволн (РРВ-25)», посвященной 80-летию отечественных ионосферных исследований (г. Томск, 2016 г.);
- II Всероссийской акустической конференции, совмещенной с XXX сессией Российского акустического общества (г. Нижний Новгород, 2017 г.).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 10 научных работ в рецензируемых журналах (6 из которых входят в список ВАК и проиндексированы в Web of Science и в SCOPUS, 4 – в список РИНЦ), 17 публикаций в материалах научных мероприятий. Получены 2 свидетельства о регистрации электронного ресурса, 2 свидетельства о государственной регистрации базы данных.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, содержащего 72 наименования, и приложения. Работа содержит 113 листов машинописного текста, 42 рисунка, 6 таблиц.

ГЛАВА 1. АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ: ДИАПАЗОНЫ ИЗМЕРЕНИЯ, СПОСОБЫ РЕГИСТРАЦИИ

1.1 Механизмы генерации акустической эмиссии

Акустической эмиссией называют процессы излучения упругих волн, вызванных внутренними источниками, расположенными в толще твердого тела, при внешнем локальном воздействии на него [Грешников, Дробот, 1976]. Основными причинами возникновения АЭ являются процессы пластической деформации, связанные с появлением и развитием дефектов кристаллической решетки твердого тела (дислокаций), возникновение и развитие микро- и макротрещин, фазовые превращения, процессы трения. Движение дислокаций и их скоплений является одним из основных физических механизмов генерации акустической эмиссии [Ультразвук, 1979]. Описание этого движения в рамках теории упругости [Ландау, Лифшиц, 1987] показывает, что при изменении формы или скорости дислокаций они излучают в окружающую среду упругую волну. [Грешников, Дробот, 1976]. Причем неравномерность и прерывистость дислокационных процессов определяет импульсный характер излучения [Ультразвук, 1979].

В силу того, что твердые тела обладают свойствами упругости формы и объема, упругие колебания в них обычно характеризуются изменением напряжения σ_{ij} , смещением частиц u_i , потенциалом смещения χ_i и деформацией ε_{ij} . [Ермолов и др., 1991].

Напряжение определяется как сила, действующая на единицу площади поверхности. Если сила направлена перпендикулярно элементу поверхности, то напряжение называют нормальным напряжением или давлением, а если сила действует по касательной, такое напряжение является сдвиговым (касательным). [Шерифф, Гелдарт, 1987]. Таким образом, напряженное состояние твердого тела характеризуют тензором напряжений (1.1) – таблицей из девяти чисел-компонентов σ_{ij} , где первый индекс обозначает направление силы, а второй - плоскость, к которой

она приложена. Напряжения σ_{xx} , σ_{xy} , σ_{xz} – нормальные (растягивающие или сжимающие), остальные напряжения – сдвиговые. Если среда находится в состоянии статического равновесия, то тензор напряжений является симметричным: $\sigma_{ij}=\sigma_{ji}$. [Уайт, 1986; Шерифф, Гелдарт, 1987; Ермолов и др., 1991]

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix}. \quad (1.1)$$

Деформация ε_{ij} представляет собой изменение формы и объема твердого тела, т.е. изменение взаимного расположения du точек тела, под влиянием приложенных сил. [Ландау, Лифшиц, 1987; Шерифф, Гелдарт, 1987]. Различают деформации растяжения-сжатия (нормальные), когда точки тела сдвигаются вдоль отрезка, их соединяющего, и деформации сдвига, когда точки сдвигаются перпендикулярно этому отрезку. Деформацию представляют в виде симметричного тензора (1.2):

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix}, \quad (1.2)$$

где деформации растяжения-сжатия вдоль осей x , y , z равны соответственно

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x}, \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y}, \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z},$$

а деформации сдвига имеют вид [Ландау, Лифшиц, 1987; Шерифф, Гелдарт, 1987; Ермолов и др., 1991]:

$$\varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yx} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x}, \quad \varepsilon_{xz} = \varepsilon_{zx} = \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x}, \quad \varepsilon_{yz} = \varepsilon_{zy} = \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y}.$$

При малых деформациях связь между ними и напряжениями устанавливается законом Гука, согласно которому деформация прямо пропорциональна обусловившему ее напряжению. Если среда изотропна, закон Гука в обобщенном виде может быть представлен в относительно простой форме [Шерифф, Гелдарт, 1987; Ермолов и др., 1991]:

$$\sigma_{ij} = \delta_{ij} \Lambda \varepsilon_{ii} + 2\mu \varepsilon_{ij}, \quad (1.3)$$

где $\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$; Λ и μ – постоянные Ламэ. Величина μ называется

жесткостью или модулем сдвига, она характеризует сопротивляемость тела действию сдвиговой деформации [Шерифф, Гелдарт, 1987].

Несмотря на широкое применение закона Гука, он не выполняется при напряжениях, превышающих предел упругости. Как следствие, деформации нарастают интенсивнее и полностью не исчезают при снятии напряжений [Шерифф, Гелдарт, 1987].

Применяя второй закон Ньютона к элементарному объему $dx dy dz$ и подставляя вместо напряжений деформации из (1.3), в [Ландау, Лифшиц, 1987; Ермолов и др., 1991] получают уравнения распространения волн в упругой среде:

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} - (\Lambda + \mu) \frac{\partial \varepsilon}{\partial i} - \mu \nabla^2 u_i = 0, \quad i = x, y, z \quad (1.4)$$

где ρ - плотность среды, $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – оператор Лапласа.

В терминах векторного анализа эти уравнения можно записать одной формулой:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\Lambda + \mu) \text{grad div } u + \mu \nabla^2 u \quad [\text{Ермолов и др., 1991}]. \quad (1.5)$$

Если принять $\mu=0$ и считать смещения одинаковыми по всем направлениям: $u_x = u_y = u_z = u$ уравнение (1.5) перейдет в волновое уравнение для жидкостей или газов:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 u,$$

где $c = \sqrt{\frac{\Lambda}{\rho}}$ – скорость распространения акустических волн [Ермолов и др., 1991].

Аналогичные волновые уравнения можно вывести и для других упругих величин, таких как давление, потенциал и т.д. [Ермолов и др., 1991].

Если представить смещение u в виде суммы двух векторов со скалярным и векторным потенциалами:

$$u = u_l + u_t = \text{grad} \varphi + \text{rot} \psi, \quad (1.6)$$

а затем подставить (1.6) в (1.5) и применить к нему операции rot и div , учитывая, что $\text{rot} u_l = \text{div} u_t = 0$, то [Ермолов и др., 1991]:

$$\frac{\partial^2 u_l}{\partial t^2} - c_l^2 \nabla^2 u_l = 0; \quad c_l = \sqrt{\frac{(\Lambda + 2\mu)}{\rho}}, \quad (1.7)$$

$$\frac{\partial^2 u_t}{\partial t^2} - c_t^2 \nabla^2 u_t = 0; \quad c_t = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}. \quad (1.8)$$

Из (1.7) и (1.8) следует, что в твердом теле могут распространяться волны двух типов, имеющие разные скорости c_l и c_t . Волны первого типа (u_l) называют продольными, растяжения-сжатия или P -волнами, направление колебаний в них совпадает с направлением распространения. Волны второго типа (u_t) – поперечными, сдвиговыми или S -волнами, в них колебания совершаются перпендикулярно направлению распространения. Деформации в продольных волнах являются деформациями растяжения-сжатия, а в поперечных – сдвиговыми [Шерифф, Гелдарт, 1987].

Таким образом, в результате пластической деформации твердых тел, связанной с появлением и развитием дислокаций, возникает акустическая эмиссия. Неравномерность и прерывистость дислокационных процессов определяет ее импульсный характер [Ультразвук, 1979]. Например, в результате нагружения тела, в некоторой его области локальные напряжения достигают предельного значения, и возникает разрыв внутренних связей. В результате в этой области происходит снятие напряжений (релаксация), которое сопровождается выделением энергии. Часть ее излучается в виде упругого импульса – сигнала АЭ [Ермолов и др., 1991].

Форма импульсов акустической эмиссии зависит от природы процесса и свойств среды. Так, при возникновении и движении дислокаций и их скоплений, трещинообразовании характерны релаксационные импульсы с крутым фронтом

и плавным спадом. Когда длительность регистрируемых импульсов меньше интервала между ними, эмиссию называют дискретной, в противном случае – непрерывной [Ермолов и др., 1991].

Одними из основных характеристик акустической эмиссии являются общее число зарегистрированных импульсов за время наблюдения, амплитуда, интегральная активность $\Omega(t)$, представляющая собой общее число импульсов в определенном интервале амплитуд dA , отнесенных к единице времени (обычно за 1 с) [Грешников, Дробот, 1976; Ермолов и др., 1991]. При исследовании направленных свойств акустического излучения также используется понятие азимутального распределения $D(\alpha, t)$ активности по направлениям $d\alpha$ [Марапулец, Шевцов, 2012].

1.2 Диапазоны измерений и способы регистрации

Акустические методы диагностирования находят широкое применение в геофизике и промышленности. В них рассматривается одно и то же явление акустической эмиссии, но на различных пространственных масштабах и соответствующих им длинам волн.

Колебания в сейсмическом диапазоне частот (доли – единицы герц) используются для получения сигналов землетрясений, оценки их характеристик, мониторинга взрывов, а также в сейсмической разведке [Аки, Ричардс, 1983; Шерифф, Гелдарт, 1987]. Обычно в качестве датчиков здесь выступают сейсмографы – приборы, установленные на земной поверхности, регистрирующие смещения ее точек при землетрясениях или взрывах. Сейсмографы преобразуют колебания в электрический сигнал и записывают его в аналоговом или цифровом видах. Структурно такие приборы состоят из маятника и системы регистрации его колебаний. Также для записи сейсмических волн применяются деформографы (деформометры) – приборы, измеряющие деформации поверхности Земли [Аки, Ричардс, 1983; Уайт, 1986].

Сигналы в диапазоне первых десятков герц, называемые высокочастотными сейсмическими шумами (ВСШ), применяются для исследования длиннопериодных деформационных процессов [Рыкунов и др., 1978, 1979; Салтыков, 1995; Салтыков и др., 1997; К вопросу о связи ..., 1995] (штормовых микросейсм, волн от удаленных землетрясений, собственных колебаний Земли, лунно-солнечных приливов и т.д.), предвестников сильных землетрясений [Салтыков, Кугаенко, 2007; Предвестники сильных землетрясений ..., 2008], поиска и разведки залежей полезных ископаемых [Шерифф, Гелдарт, 1987]. Для регистрации сигналов ВСШ используется резонансный узкополосный вертикальный сейсмометр с чувствительным элементом в виде пьезокерамической пластины [Рыкунов и др., 1978]

Акустические наблюдения в частотном диапазоне от десятков герц до нескольких килогерц проводятся в штольнях и скважинах различной глубины для исследования и контроля изменения напряженного состояния геосреды. Для регистрации колебаний используются приемники с магнитоупругим преобразователем [Беляков, Николаев, 1993, 1995; Гаврилов и др., 2006].

Регистрация сигналов в более широком диапазоне частот возможна с помощью гидрофонов – пьезокерамических преобразователей, погруженных в воду [Гидроакустическая локация ..., 2003; Купцов и др., 2004]. Использование приемников такого типа позволяет расширить частотный диапазон исследуемых сигналов от 0.1 Гц до первых десятков кГц, а их размещение на суше в закрытых водоемах – исключить влияние естественных и других шумов океана. На основе таких приборов построены системы наблюдения высокочастотной (килогерцовой) геоакустической эмиссии, которые используются для исследования приповерхностных осадочных пород [Купцов и др., 2004; Купцов, 2005].

Колебания в ультразвуковом диапазоне (от десятков килогерц до десятков мегагерц) широко применяются в промышленности, например, для локального разрушения хрупких прочных материалов, диспергирования, коагуляции и т.д. Еще одна область применения АЭ в данном диапазоне частот - неразрушающий контроль объектов, который состоит в оценке разрушающей нагрузки для объекта при воздействии на него испытательной нагрузки или в диагностике работы объекта

при воздействии на него рабочей нагрузки. Объектами испытаний могут являться сосуды давления, трубные системы, детали самолетов и ракет, мосты и другие строительные сооружения [Грешников, Дробот, 1976; Ермолов и др., 1991; Ohtsu, 2008]. Метод акустоэмиссионного контроля в том же частотном диапазоне применяется и в геофизике на образцах горных пород, в частности для исследования механизма трещинообразования в материале [Соболев и др., 1989; Виброупругость ..., 2001].

1.3 Аномалии акустической эмиссии, связанные с землетрясениями

Результаты исследований акустической эмиссии в сейсмоактивных регионах показывают, что в широком диапазоне частот регистрируются изменения в характере эмиссии в периоды подготовки землетрясений и последующей релаксации.

Так, в серии работ по исследованию высокочастотного сейсмического шума (от 10 до 60 Гц) [Салтыков и др., 1997; Организация наблюдений ..., 2006; Предвестники сильных землетрясений ..., 2008] на Камчатке показано, что перед сильными землетрясениями с магнитудой $M \geq 6.0$ на эпицентральной расстоянии до 250 км наблюдается стабилизация фазы приливной компоненты ВСШ на определенном уровне в течение нескольких месяцев, а после землетрясения происходит ее резкое изменение. Для регистрации сигналов ВСШ использовался пьезодинамический сейсмометр [Рыкунов и др., 1978], установленный в штольне в склоне сопки, в скальных породах.

Проведенный в работах [Сасорова, Левин, 1999; Гидроакустическая локация ..., 2003] совместный анализ сейсмических событий в Тихом океане в районе Камчатки и гидроакустических сигналов на частотах 40-110 Гц, полученных с помощью плоской гидроакустической антенны типа «Агам», расположенной в непосредственной близости от дна, показал, что перед землетрясениями появляется высокочастотный сейсмический шум.

Акустическая эмиссия в диапазоне частот от сотен герц до полутора килогерц так же эффективно используется для задач исследования предвестников землетрясений. В работе [Геоакустический предвестник ..., 1991] описано аномальное возмущение акустического сигнала в диапазоне от 800 до 1200 Гц, возникшее за 16 часов до катастрофического Спитакского землетрясения с магнитудой $M = 7.1$, произошедшего в Армении в 1988 г. Эпицентр землетрясения располагался приблизительно в 80 км от пункта наблюдений. Аномалия наблюдалась в течение нескольких дней, сопровождая активную афтершоковую деятельность. Измерения проводились на сейсмостанции Бакуриани, в качестве акустического приемника использовался пьезопреобразователь [Грешников, Дробот, 1976].

Повышение интенсивности АЭ на частотах от 30 до 1000 Гц, начинающееся приблизительно за 12 ч перед землетрясениями и спадающее после них подобным образом, также регистрировалось в Японии в главном тоннеле Сейсмологической Обсерватории Мацуширо в 1996–1998 гг. Для наблюдений выбирались землетрясения с магнитудами $M_s \geq 3.0$ на эпицентральной дистанции до 150 км [Отклик акустической эмиссии ..., 2001]. На Камчатке в скважине на глубине 1035 м регистрировались нарушения суточного хода ГАЭ и бухтообразные аномалии среднесуточного уровня геоакустического излучения в диапазоне 30–1200 Гц перед землетрясениями с магнитудой $M_{LN} \geq 5.0$ [Гаврилов и др., 2006]. В обоих случаях для приема сейсмоакустических сигналов устанавливались геофоны с датчиками на основе магнитоупругих материалов.

Аномалии геоакустической эмиссии, сопутствующие землетрясениям, наблюдаются и в килогерцовом диапазоне частот. Это подтверждают работы [Купцов и др., 2004, 2005; Купцов, 2005; Ларионов и др., 2005], посвященные исследованию геоакустической эмиссии на частотах от 0.1 до 10000 Гц. Сигналы ГАЭ регистрировались с помощью приемных акустических систем, построенных на базе широкополосных пьезокерамических гидрофонов, размещенных в естественных и закрытых искусственных водоемах на Камчатке. Авторами установлено, что примерно в суточном временном интервале перед сильными землетрясениями с энергетическими классами $K_s \geq 11.0$ на эпицентральной дистанции до 250 км

наблюдается многократное увеличение амплитуды сигнала над фоновым уровнем в частотном диапазоне от 3 до 6 кГц (здесь и далее по тексту приведены оперативные данные по землетрясениям Камчатского филиала Федерального исследовательского центра «Единой геофизической службы Российской академии наук», для энергетической классификации землетрясений использовались классы K_s по шкале С.А. Федотова, которые связаны с магнитудой следующим соотношением $K_s = 2(M_l + 0.75)$). Аналогичное поведение акустической эмиссии перед землетрясениями зарегистрировано в Италии [Acoustic emission ..., 2002; «Storms of crustal stress» ..., 2010], но уже на частотах от 25 до 30 кГц. В качестве приемников АЭ использовались акустические преобразователи, регистрирующие сигналы в горных породах и воздухе.

Аномалии перед землетрясениями также наблюдались и в направленности геоакустического излучения на частотах от 1 до 10 кГц. Исследования в этой области проводились с помощью системы, построенной на базе комбинированного приемника. Такие приемники используются в гидроакустике для пеленгации источников естественных и промышленных шумов, а с 2004 г. применяются для наблюдения направленных характеристик высокочастотной ГАЭ на Камчатке. Так, в работах [Геоакустическая локация ..., 2006; Изучение высокочастотной геоакустической эмиссии ..., 2009; Шевцов и др., 2010; Отклик геоакустической эмиссии ..., 2012; Марапулец, Щербина, 2013] показано, что в полуторасуточном интервале перед сильными землетрясениями возникают ярко выраженные максимумы в распределении акустической активности по направлениям.

Выводы по главе 1

В акустических наблюдениях до начала XXI века наиболее востребованными были инфра- и ультразвуковой диапазоны частот, но современные исследования показали эффективность использования звукового диапазона от нескольких единиц до первых десятков килогерц для решения задач диагностирования природных сред,

в том числе при исследовании процессов подготовки и развития землетрясений. Некоторые эффекты, наблюдающиеся в этой частотной области (возникновение фоновых суточных вариаций высокочастотного акустического излучения, изменение его направленности при подготовке и во время землетрясений), в настоящее время мало изучены и требуют более детального рассмотрения.

ГЛАВА 2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ГЕОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В ПУНКТЕ «МИКИЖА» НА КАМЧАТКЕ

2.1 Измерительный комплекс

Для исследования характеристик высокочастотной геоакустической эмиссии на Камчатке в пункте наблюдений «Микижа» ($52^{\circ}59' N$, $158^{\circ}13' E$, рисунок 2.1) ИКИР ДВО РАН развернут аппаратно-программный измерительный комплекс, позволяющий проводить одновременные наблюдения разнородных геофизических полей.

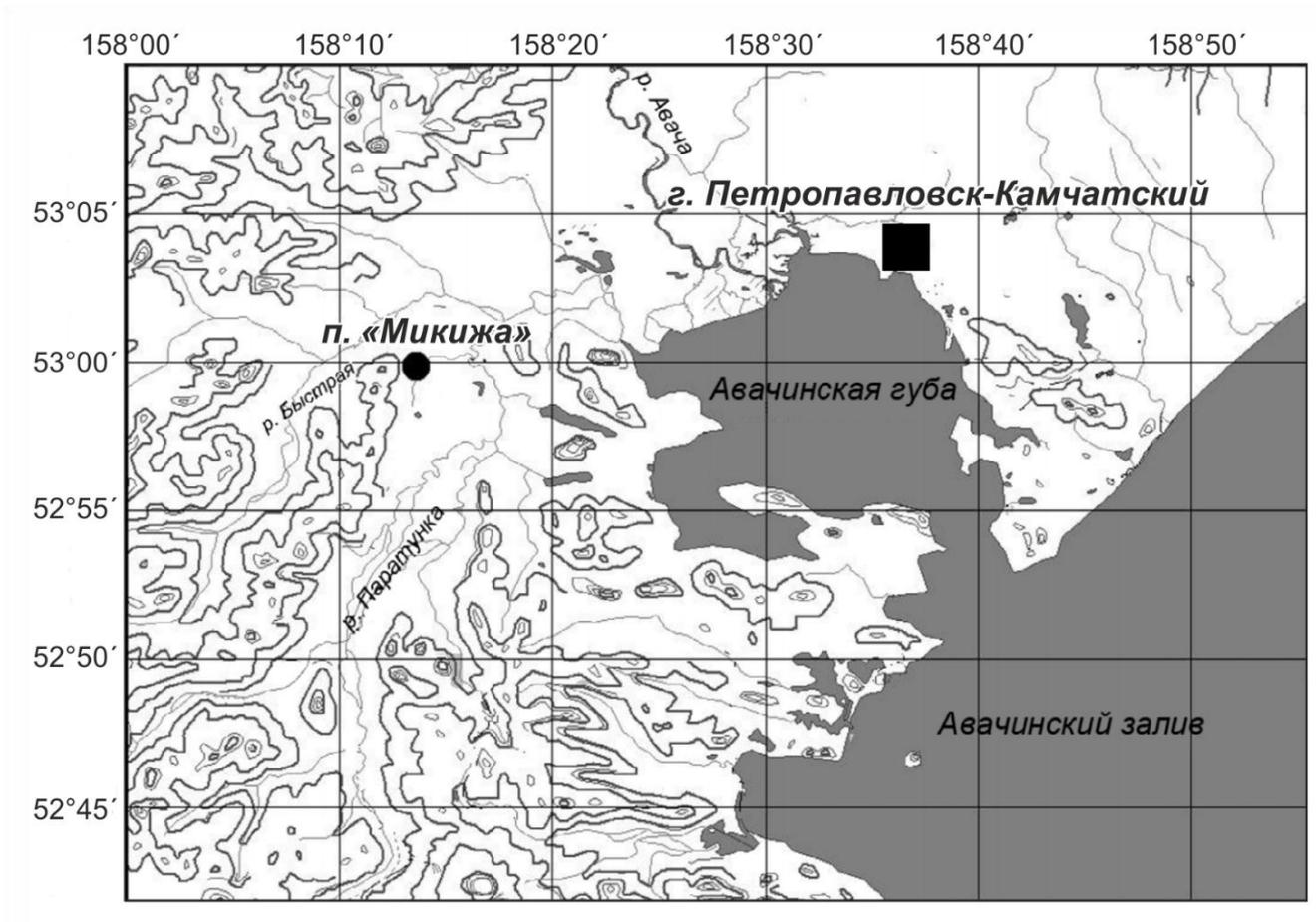


Рисунок 2.1 – Карта района исследований

Регистрация широкополосного геоакустического сигнала производится с помощью двух приемных гидроакустических систем, установленных у дна озера

Микижа. На рисунке 2.2 представлена схема их установки. По оценкам, приведенным в работах [Купцов и др., 2005; Шевцов и др., 2010; Отклик геоакустической эмиссии ..., 2012], наблюдаемые акустические сигналы генерируются сдвиговыми источниками с размерами от миллиметров до единиц метров, расположенными на расстоянии от 18 до 37 м от приемников. Прием генерируемого в грунте сигнала эмиссии осуществляется в жидкой среде. На границе раздела двух сред возникает преломление акустической волны. Поскольку поперечные колебания в воде не распространяются, для вычисления коэффициента преломления находится отношение скорости распространения продольных колебаний в осадочных породах (на юге Камчатки ее значение варьируется в пределах от 1.8 до 2.5 км/с [Аносов, 1978]) к скорости звука в пресной воде (1.5 км/с). Таким образом, коэффициент преломления составляет примерно от 1.2 до 1.7. С учетом небольших размеров контролируемого пространства эффектами преломления можно пренебречь.

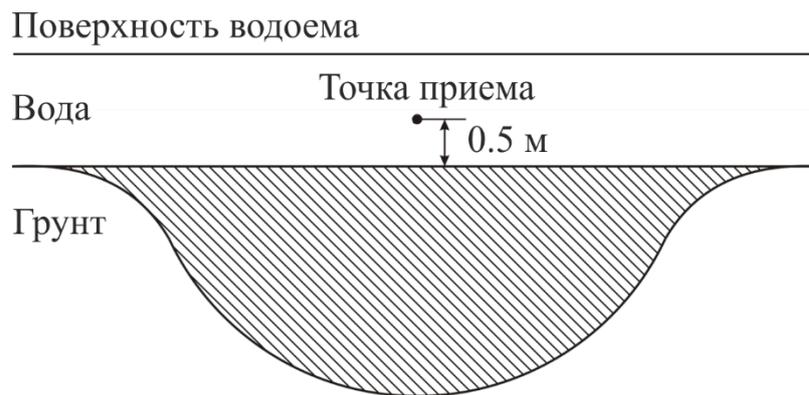


Рисунок 2.2 – Схема установки гидроакустических систем. Приведено вертикальное сечение через точки установки приемника. Штриховкой отмечена область, из которой может осуществляться прием сигнала

По результатам георадиолокационных исследований [Пинегина, 2006], проведенных на озере Микижа в районе установки измерительных систем под руководством ведущего научного сотрудника Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН д. г.-м. н. Пинегиной Т.К. «...мощность слаболитифицированных рыхлых отложений в озере в среднем составляет 3–4 м. Эти отложения, по-видимому, сформировались в позднем плейстоцене–голоцене и могут состоять из гальки, песков различной крупности и аллеврита (озерные илы)».

На радарограмме (рисунок 2.3) «...четко видны границы между слоями рыхлых отложений. Волнистые неровности соответствуют современным и погребенным каналам, связанным с ручьем, вытекающим из оз. Микижа. На глубине 10 м ниже дна озера рыхлые слоистые осадочные породы сменяются более консолидированными отложениями без четкой текстуры».

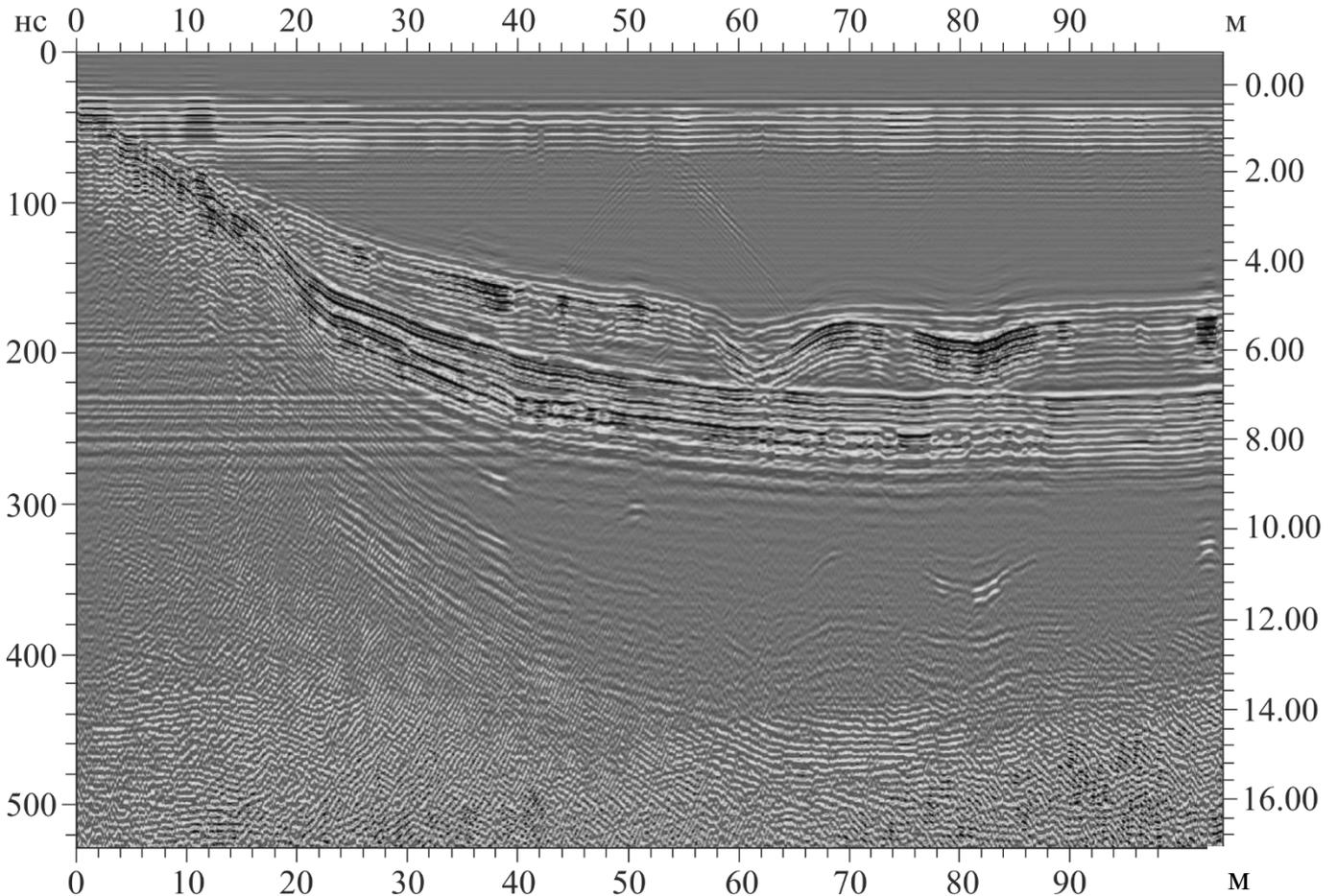


Рисунок 2.3 – Радарограмма дна озера Микижа [Пинегина, 2006]

Размер области, в пределах которой находятся сдвиговые источники регистрируемых гидроакустическими системами сигналов в несколько раз превышает мощность рыхлых отложений на дне озера Микижа. Толщина слоя «жидкого ила» в точках установки регистрирующих систем не превышает 5 см, а приемники находятся в воде примерно на 10 см выше его. Согласно натурным экспериментам [Войтенко, Моргунов, 2011], акустическая волна частотой 2500 Гц «...распространяется без дополнительных потерь и искажений в волноводе, состоящем из водного слоя и как минимум сорока сантиметрового слоя песчаного

жидкого грунта на расстояние до 2 км». Таким образом, ослаблением уровня геоакустических сигналов за счет илистых отложений на дне озера Микижа можно пренебречь.

В состав первой приемной системы, изготовленной в ИКИР ДВО РАН, входят четыре направленных пьезокерамических гидрофона, совмещенные на одном корпусе (рисунок 2.4) Их чувствительность, с учетом предварительного усиления, в килогерцовом диапазоне частот составляет порядка сотен мВ/Па. Диаграмма направленности каждого приемника равна 60 градусам. Гидрофоны ориентированы по сторонам света (кроме запада) и вертикально вниз. Система направленных гидрофонов позволяет принимать акустические сигналы в широком диапазоне частот: от 0.1 Гц до 11 кГц с целью последующего анализа.



Рисунок 2.4 – Система направленных гидрофонов

Вторая гидроакустическая система преимущественно используется для исследования пространственной структуры сигналов ГАЭ [Гордиенко, 2007; Марапулец, Щербина, 2008; Изучение высокочастотной геоакустической эмиссии ..., 2009; Марапулец, Шевцов, 2012]. Она построена на базе инерционного (соколеблющегося со средой) комбинированного приемника (КП), разработанного в ЗАО «Геоакустика» при ФГУП ВНИИФТРИ (рисунок 2.5а). КП объединяет в себе сферический преобразователь акустического давления и трехкомпонентный приемник градиента давления, датчики которого расположены вдоль взаимно ортогональных направлений. Рабочий диапазон частот комбинированного приемника составляет от 5 Гц до 11 кГц, спектральная чувствительность вместе с предусилителями канала давления – до 500 мВ/Па, градиента давления – примерно

20 мВ/Па на частоте 10 кГц. Амплитудные характеристики направленности компонент приемника приведены на рисунке 2.5б [Гордиенко, 2007]. Использование приемника такого типа позволяет определять направления на источники геоакустического излучения векторно-фазовыми методами.

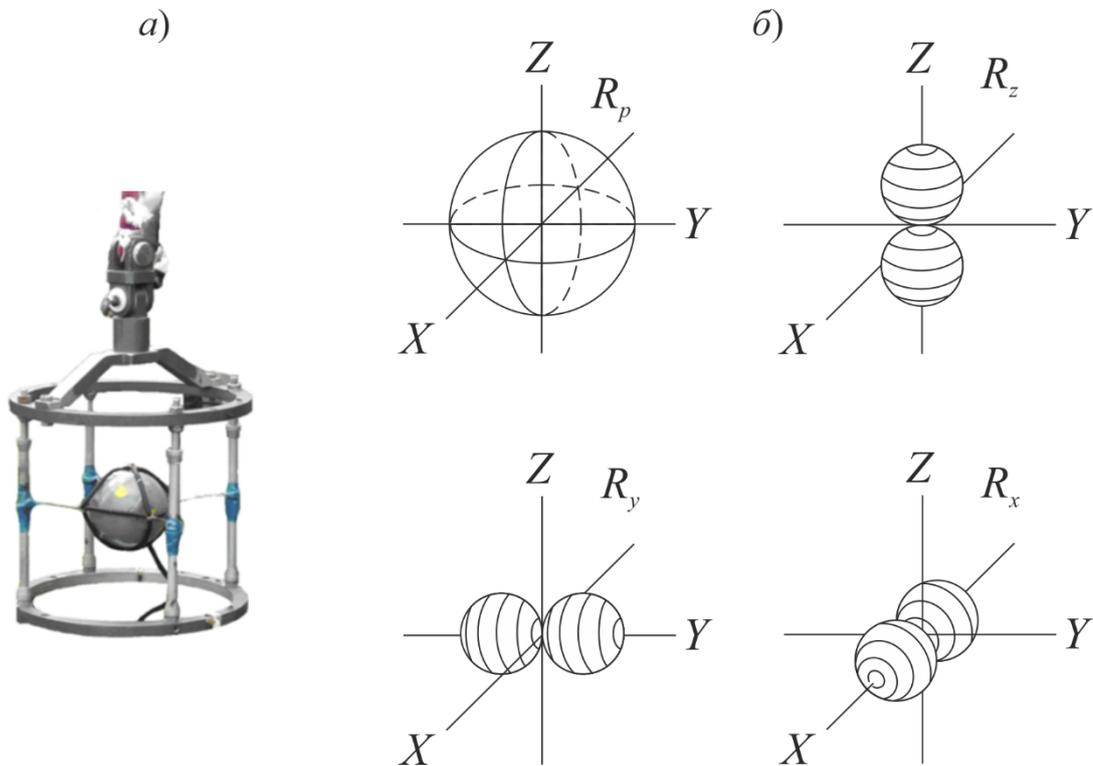


Рисунок 2.5 – Комбинированный приемник (а) и амплитудные характеристики направленности приемника давления R_p и приемников градиента давления R_x , R_y , R_z (б, [Гордиенко, 2007])

Сигналы с выходов приемных систем после усиления оцифровываются с частотой дискретизации 48 кГц и записываются на жесткий диск персонального компьютера. После чего с использованием параллельных вычислений на графических процессорах производится частотно-временная обработка записанных данных. Осуществляется цифровая фильтрация в семи частотных поддиапазонах: от 0.1 до 10, от 30 до 60, от 70 до 200, от 200 до 600, от 600 до 2000, от 2000 до 6500, от 6500 до 11000 Гц с последующим детектированием, интегрированием и синхронной записью отсчетов с частотой 1 Гц по каждому из каналов гидроакустических систем. Таким образом, один отсчет представляет собой значение акустического давления,

накопленного за одну секунду в соответствующем поддиапазоне частот. Параллельно, в автоматическом режиме производится анализ потока геоакустических импульсов, определение их направленности [Марапулец, Щербина, 2008] и частотно-временной анализ сигналов с применением разреженной аппроксимации [Марапулец и др., 2014]. Структурная схема регистрации геоакустической эмиссии представлена на рисунке 2.6.

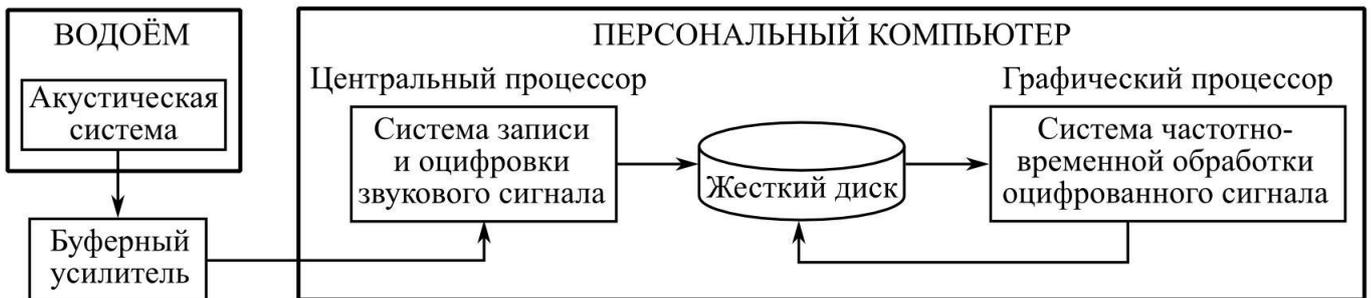


Рисунок 2.6 – Структурная схема регистрации геоакустической эмиссии

Также в пункте «Микижа» производится регистрация наклона земной поверхности, по величине которого можно оценить деформации приповерхностных пород в зоне наблюдений. Для этого в 150 м от места размещения гидроакустических систем на берегу озера в закрытой яме с размерами 0.5×0.5×0.5 м на металлической опоре с центральной стойкой, заглубленной в землю на 0.3 м установлен инклинометр (наклономер) Leica Nivel 220. Чувствительность прибора составляет 0.001 мрад, предельно допустимая абсолютная погрешность измерения не больше 0.0047 мрад, диапазон измерения ± 1.51 мрад. Данные записываются с частотой 0.5 Гц отдельной системой на базе персонального компьютера [Марапулец, Солодчук, 2016].

Для регистрации метеовеличин используется цифровая метеостанция Conrad WS-2300, установленная рядом с инклинометром. С ее помощью один раз в 10 минут измеряются атмосферное давление, температура воздуха, его относительная влажность, интенсивность дождя и скорость ветра. Также с августа по сентябрь 2013 г. в непосредственной близости от системы направленных гидрофонов был установлен датчик для измерения температуры воды в озере.

Данные, принятые всеми системами, после предварительной обработки передаются на сервер Института, где проводится детальное исследование

характеристик сигналов высокочастотной геоакустической эмиссии в спокойные периоды и в периоды активизации деформационного процесса, а также оценивается влияние метеоусловий на поведение ГАЭ.

2.2 Геоакустическая эмиссия в фоновые периоды и при активизации деформации

Детальное исследование и классификация зарегистрированных геоакустических сигналов производится как по широкополосным, так и по прошедшим частотно-временную обработку данным.

Анализ сигналов в диапазоне частот от 0.1 до 11000 Гц, проведенный в работах [Купцов и др., 2005; Методы исследования, 2008; Отклик геоакустической эмиссии ..., 2012] показывает, что в случае умеренных шумов, когда наблюдаются отдельные импульсы, сигналы геоакустической эмиссии, благодаря их специфической форме, можно легко выделить на фоне помех, источники которых могут быть разнообразного происхождения. В случае интенсивных шумов, когда имеет место мощный непрерывный сигнал, можно выделить аномальные возмущения ГАЭ по их характерным признакам. Они могут быть обусловлены деформационными процессами, метеоусловиями и техногенным воздействием. Сигналы ГАЭ, возмущения в которых обусловлены неблагоприятными метеоусловиями и техногенными воздействиями, специфичны и достаточно легко распознаются и учитываются при анализе возмущений звуковой эмиссии на предварительном этапе обработки данных [Методы исследования ..., 2008; Марапулец, Шевцов, 2012].

Сигналы деформационной природы возникают в результате локального изменения напряженно-деформированного состояния приповерхностных осадочных пород в пункте наблюдений. Все их разнообразие складывается из различных комбинаций релаксационных импульсов различной амплитуды и длительности, с ударным возбуждением и частотой заполнения от сотен герц до десятков килогерц. Частота их следования составляет от 0.1 до 0.5 импульсов в секунду в фоновые

периоды и может достигать десятков и даже сотен в секунду в моменты активизации пластического процесса, в том числе и перед землетрясениями [Купцов и др., 2005; Отклик геоакустической эмиссии ..., 2012].

В качестве примеров рассмотрим сигналы, принимаемые каналом градиента давления комбинированного приемника, т.к. его амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) более равномерна во всем диапазоне принимаемых частот по сравнению с АЧХ направленных гидрофонов, при этом на низких частотах чувствительности КП вполне достаточно для обнаружения сейсмических событий.

Фрагмент сигнала, зарегистрированного в спокойный (фоновый) период, и его спектр представлены на рисунке 2.7. Из рисунка видно, что сигнал 2.7а представляет собой серию довольно редких, незначительных по амплитуде импульсов. Его спектр 2.7б сглажен и имеет плавный спад с ростом частоты, что характерно для розового шума. Степенной характер изменений в спектре говорит о том, что сигнал является фликкер-шумом. Локальный максимум в области от 18 до 21 кГц обусловлен резонансом приемника, а подъем на низких частотах связан с краевыми эффектами вычисления быстрого преобразования Фурье, используемого при расчете спектра [Марапулец, Шевцов, 2012].

Во время активизации деформационного процесса наблюдается увеличение как амплитуды импульсов, так и их количества в единицу времени, при этом они могут сливаться в непрерывный сигнал [Купцов и др., 2005; Марапулец, Шевцов, 2012]. Пример такого сигнала, записанного 16 ноября 2007 г., и его спектр приведены на рисунках 2.8 и 2.9 соответственно.

В спектре сигнала деформационных возмущений (рисунок 2.9) наблюдается значительное повышение уровня шумов в диапазоне от 1 до 18 кГц по сравнению со спектром сигнала в фоновый период (рисунок 2.7), а сам сигнал уже можно отнести к почти белому шуму. Довольно часто, но не всегда, такие сигналы предваряют сейсмические события [Купцов и др., 2005; Марапулец, Шевцов, 2012].

Аномальные возмущения геоакустической эмиссии наблюдаются и при анализе данных, прошедших частотно-временную обработку, после которой они представляют собой огибающую сигнала ГАЭ во времени («интегральный

сигнал»). По ее изменениям можно оперативно выявлять аномальные возмущения эмиссии в соответствующих частотных поддиапазонах [Купцов, 2005; Купцов и др., 2005; Геоакустическая локация ..., 2006; Деформационные и акустические предвестники ..., 2007; Аномалия высокочастотных сигналов ..., 2008; Шевцов и др., 2010]. Аномалии в сигнале могут возникать при неблагоприятной погоде и в результате техногенного воздействия, также, как и в широкополосных данных. Наиболее ярко они проявляются в частотных диапазонах от 600 Гц и выше. При этом они остаются достаточно специфичными и легко учитываются.

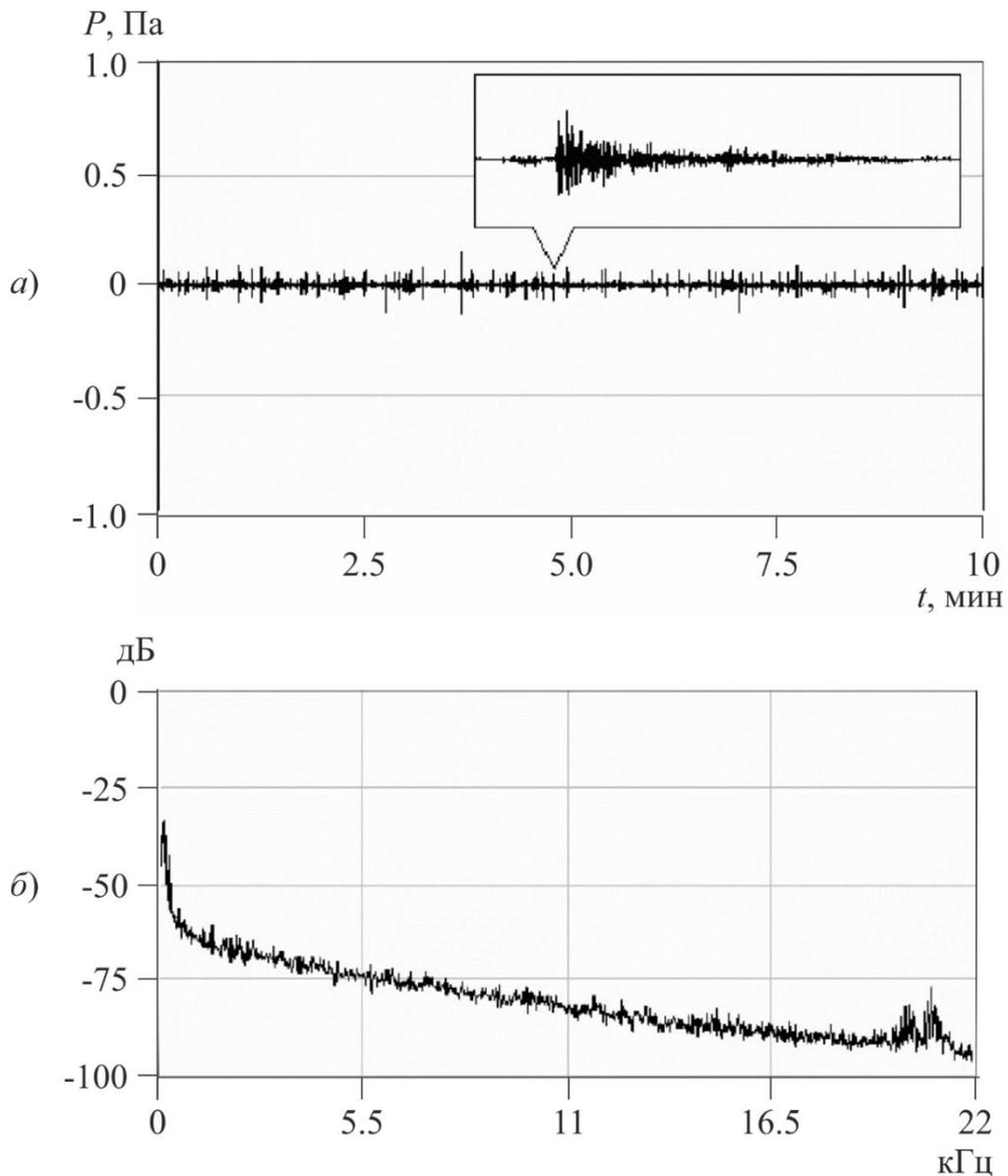


Рисунок 2.7 – Фрагмент широкополосной записи геоакустического сигнала (а) и его энергетический спектр (б), на выноске одиночный импульс. P – акустическое давление, Па [Марапулец, Шевцов, 2012]

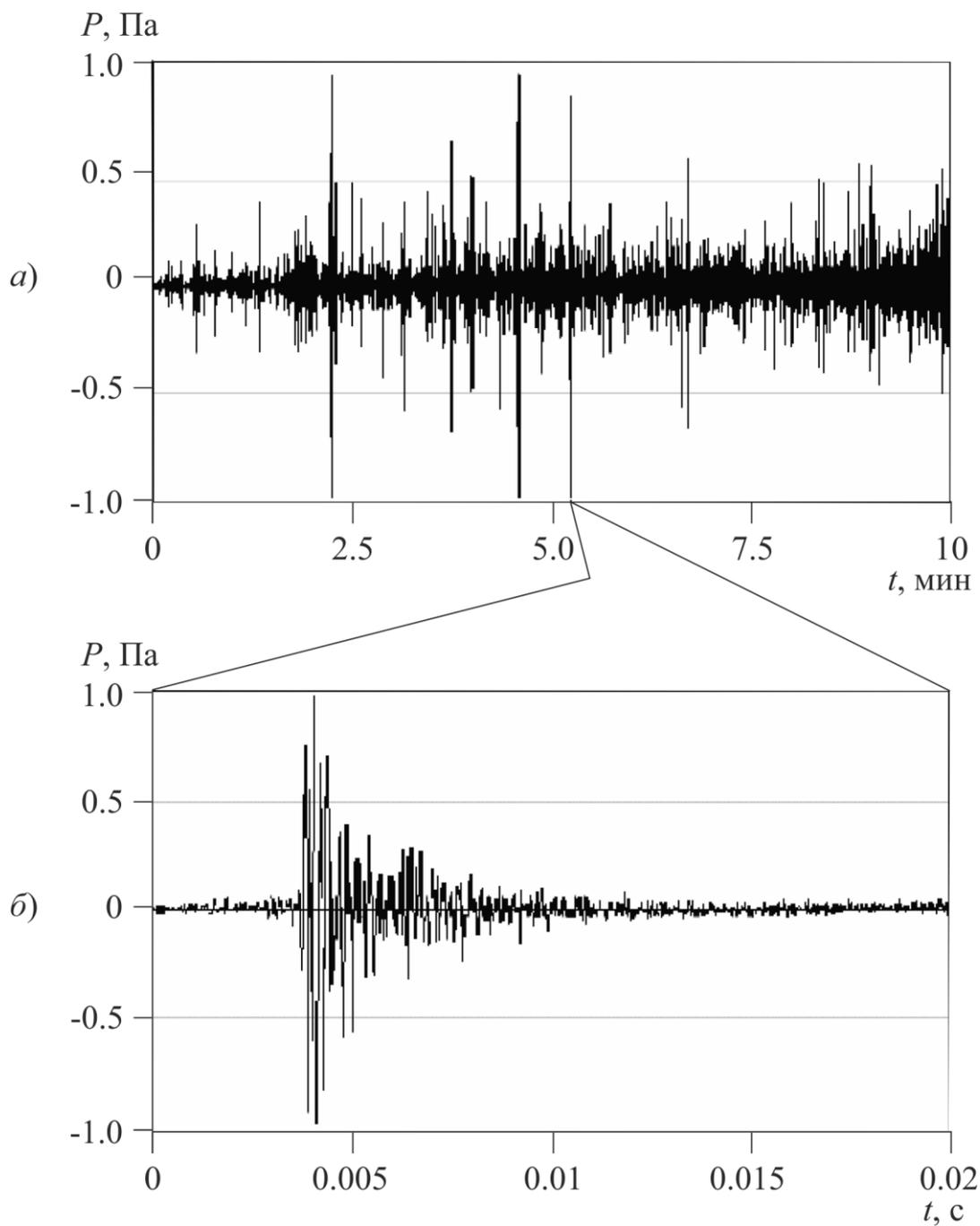


Рисунок 2.8 – Фрагмент сигнала (а) и его одиночный импульс (б).
 P – акустическое давление, Па [Марапулец, Шевцов, 2012]

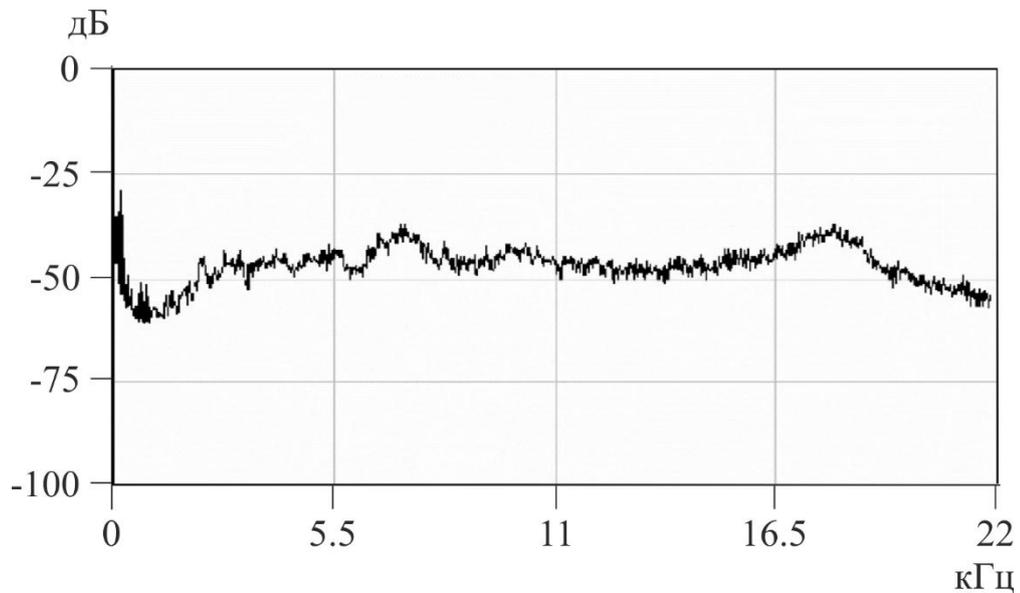


Рисунок 2.9 – Энергетический спектр сигнала 16.11.2007 г. [Марапулец, Шевцов, 2012]

При активизации деформационного процесса, в том числе при подготовке землетрясений, наблюдаются аномальные всплески в интегральном сигнале эмиссии в килогерцовых диапазонах частот (от 2000 и более Гц, реже в диапазоне от 600 до 2000 Гц). Их можно разделить на аномалии в виде повторяющихся пульсаций и аномалии, представляющие собой резкое продолжительное увеличение уровня акустических шумов. Во втором случае по сравнению с фоновым периодом резко возрастают амплитуда импульсов эмиссии и их частота следования [Купцов и др., 2005; Марапулец, Шевцов, 2012]. Примеры таких аномальным возмущений сигнала геоакустической эмиссии, расфильтрованного в семи частотных диапазонах, приведены на рисунках 2.10 и 2.11.

Иногда аномальные всплески продолжаются и после землетрясения. Так, на рисунке 2.12а представлен пример пред- и постсейсмического возмущения геоакустической эмиссии в диапазоне от 2 до 6.5 кГц. На рисунке видно, что примерно за 10 ч до землетрясения, произошедшего 15 октября 2012 г. в 01:19 UT (координаты эпицентра: 51.53° N, 160.06° E), с энергетическим классом $K_s = 13.5$ на эпицентральной расстоянии $R=200$ км на глубине $H=45$ км появилось акустическое возмущение, которое длилось до момента самого сильного афтершока, зарегистрированного 15 октября 2012 г. в 22:45 UT (координаты эпицентра: 51.63° N,

159.95° E), с $K_s = 12.6$ на $R=190$ км и $H=46$ км. Аномалия накопленного на секундном интервале акустического давления P_s характеризуется устойчивыми во времени, особенно после главного землетрясения, квазипериодическими пульсациями давления с периодом повторения около 6 мин. По данным метеостанций атмосферное давление в рассматриваемое на рисунке 2.12 время менялось слабо, сильный и умеренный ветер отсутствовал и до 18 ч 15 октября не было дождя. Поэтому акустические возмущения перед главным землетрясением 15 октября вызваны, наиболее вероятно, деформированием приповерхностных осадочных пород в пунктах на заключительной стадии подготовки землетрясения. Произошедший через 21.5 ч сильный афтершок свидетельствует о неполном снятии напряжений, накопленных в очаговой области, и акустические возмущения после главного землетрясения можно объяснить продолжением деформирования пород в пункте наблюдений.

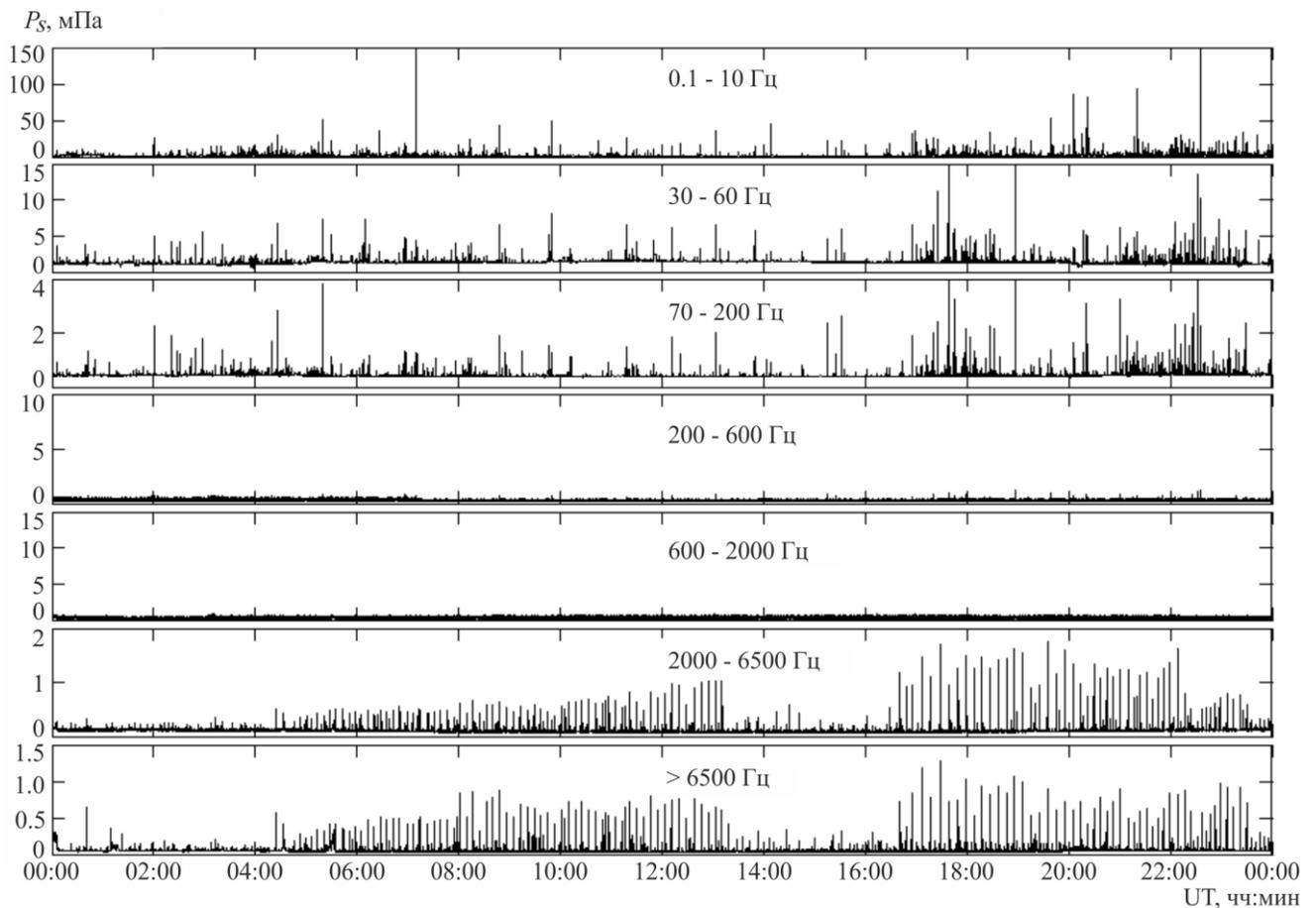


Рисунок 2.10 – Пример аномалии геоакустической эмиссии в виде квазипериодических пульсаций, зарегистрированных 11.08.2009 [Марапулец, Шевцов, 2012]

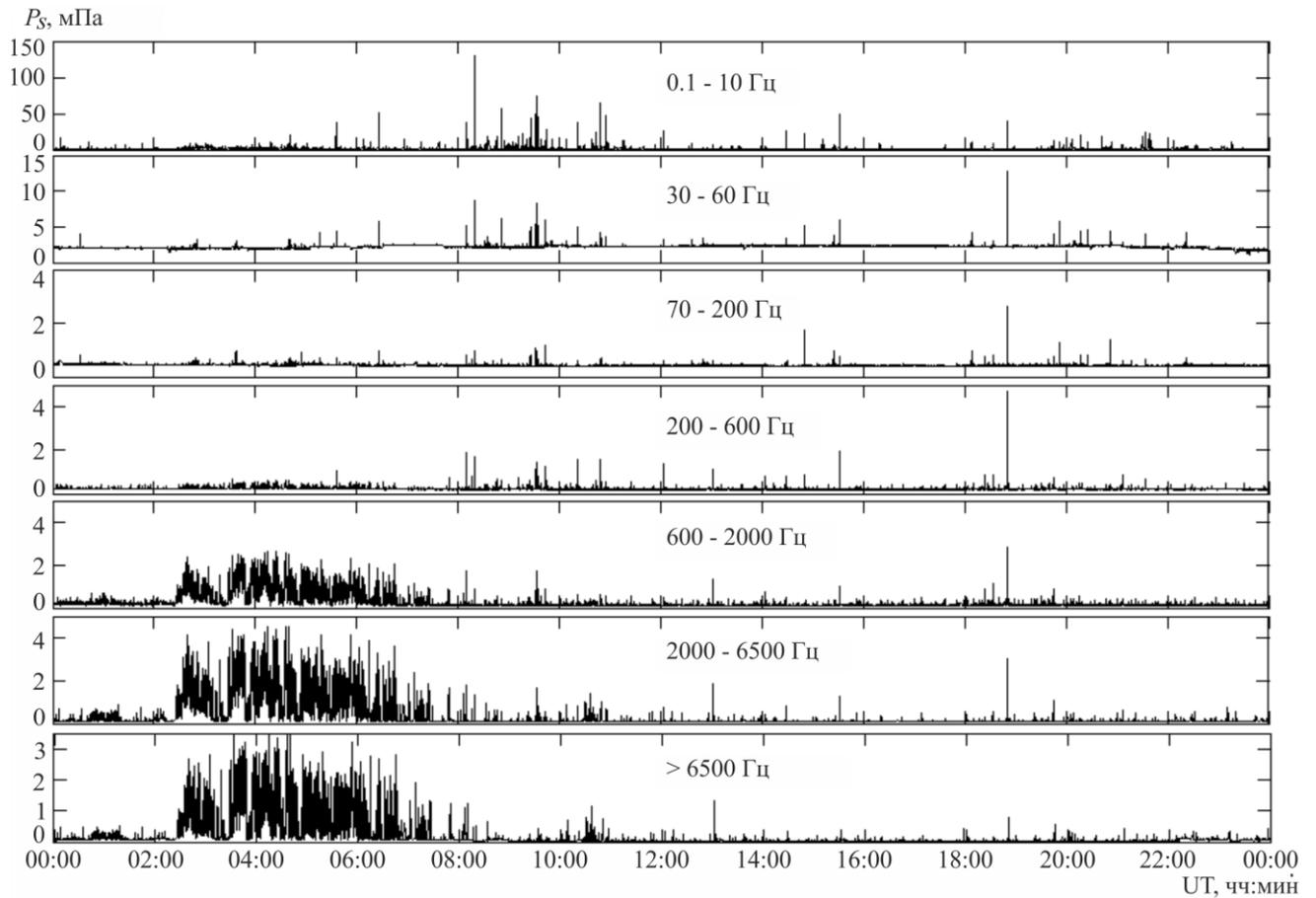


Рисунок 2.11 – Пример аномалии эмиссии в виде увеличения уровня шумов, зарегистрированных 03.12.2009 [Марапулец, Шевцов, 2012]

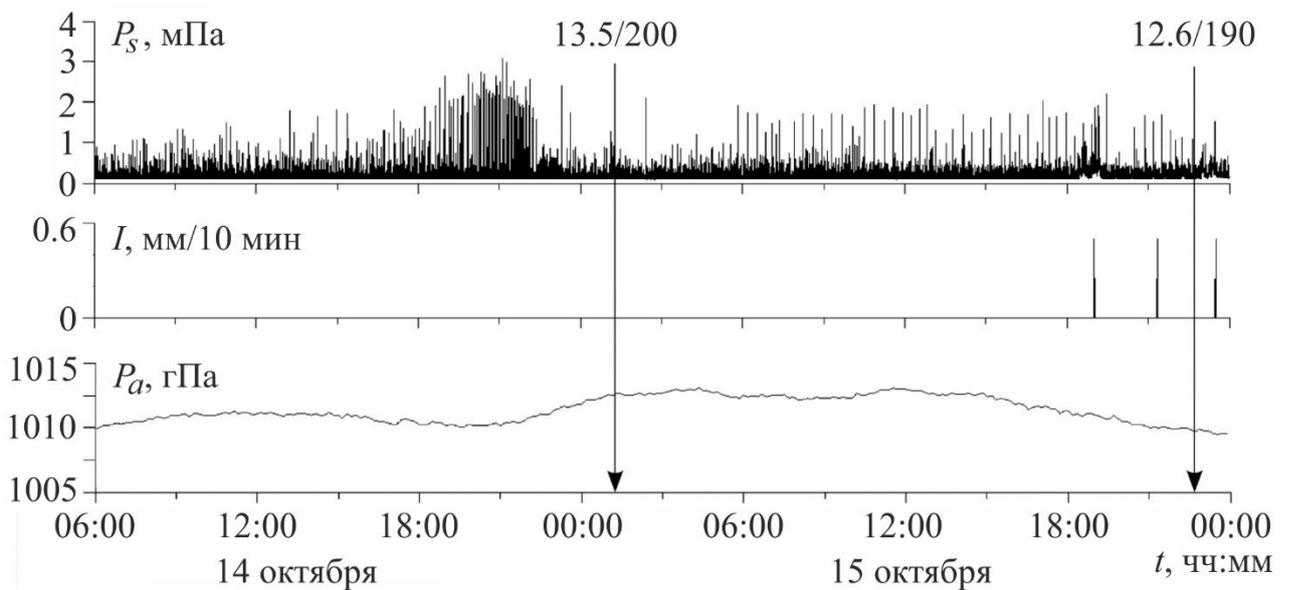


Рисунок 2.12 – Отклик геоакустической эмиссии на землетрясение с $K_s = 13.5$.

P_s – накопленное на секундном интервале акустическое давление в диапазоне от 2 до 6.5 кГц (а), I – интенсивность осадков (б), P_a – атмосферное давление (в)

Поведение высокочастотной геоакустической эмиссии в периоды активизации деформационного процесса изучено достаточно подробно [Купцов, 2005; Купцов и др., 2005; Геоакустическая локация ..., 2006; Деформационные и акустические предвестники ..., 2007; Аномалия высокочастотных сигналов ..., 2008; Шевцов и др., 2010; Отклик геоакустической эмиссии ..., 2012] в отличие от характеристик излучения в спокойные периоды. Исследование фоновых характеристик геоакустической эмиссии в килогерцовом диапазоне частот и их последующий анализ важны для понимания физики регистрируемых эффектов.

2.3 Характеристики суточного хода геоакустической эмиссии

Длиннопериодные деформационные процессы, такие как собственные колебания Земли, лунно-солнечные приливы, волны от удаленных землетрясений, вносят определенный вклад в формирование структуры сигнала высокочастотной геоакустической эмиссии. Изучение характеристик регистрируемого сигнала, в частности периодических составляющих, в спокойные (фоновые) периоды является важной частью исследования механизма образования геоакустического излучения и объяснения причин связи эмиссии с локальными деформациями в пунктах наблюдений. Кроме того, в ряде публикаций, посвященных исследованиям высокочастотного сейсмического шума [Салтыков и др. 1997; Салтыков, Кугаенко, 2007] и геоакустической эмиссии в диапазоне десятков–сотен Гц, наблюдаемой в скважинах [Беляков и др., 2011; Гаврилов и др., 2006; Гаврилов, 2007] показано аномальное поведение периодических составляющих сигналов перед сильными землетрясениями. Поэтому целесообразно проанализировать наличие таких аномалий и в периодических вариациях высокочастотной геоакустической эмиссии.

Для исследования периодических составляющих ГАЭ использовались данные, зарегистрированные системой направленных гидрофонов (рисунок 2.4). В результате визуального анализа данных было выявлено наличие суточной вариации (суточного хода), амплитуда которой достигала максимума в период с 4 до 5 ч UT (дневное время

в месте регистрации). Анализ записей геоакустических шумов (рисунок 2.13) в периоды ее максимума и минимума показал, что в максимуме (рисунок 2.13а) акустический сигнал более зашумлен. При спектральном анализе в этот период выявлен повышенный уровень спектральных компонент в диапазоне частот от 800 Гц до 6–7 кГц по сравнению с минимумом суточного хода (рисунок 2.13б).

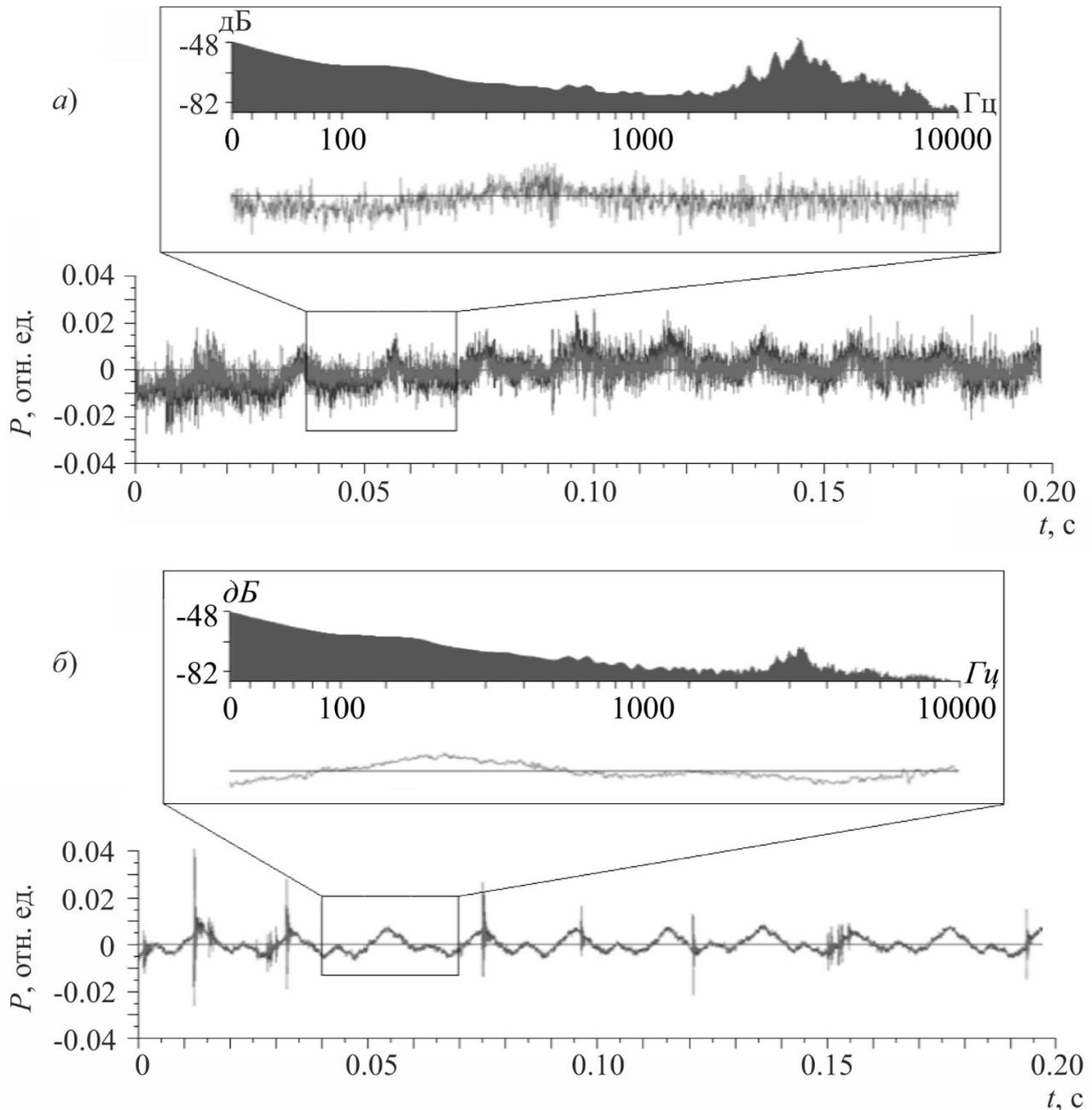


Рисунок 2.13 – Фрагменты регистрации акустической эмиссии в период максимума (а) и минимума (б) суточного хода 19.08.2007. Во вкладках вверху показаны выделенные в прямоугольник участки и их спектры. P – акустическое давление

С учетом этого, при последующем анализе использовались секундные данные частотного поддиапазона от 2.0 до 6.5 кГц, очищенные с помощью вейвлет-преобразования от мешающих шумов [Солодчук, 2012]. На рисунке 2.14 представлен фрагмент данных до (рисунок 2.14а) и после очистки (рисунок 2.14б).

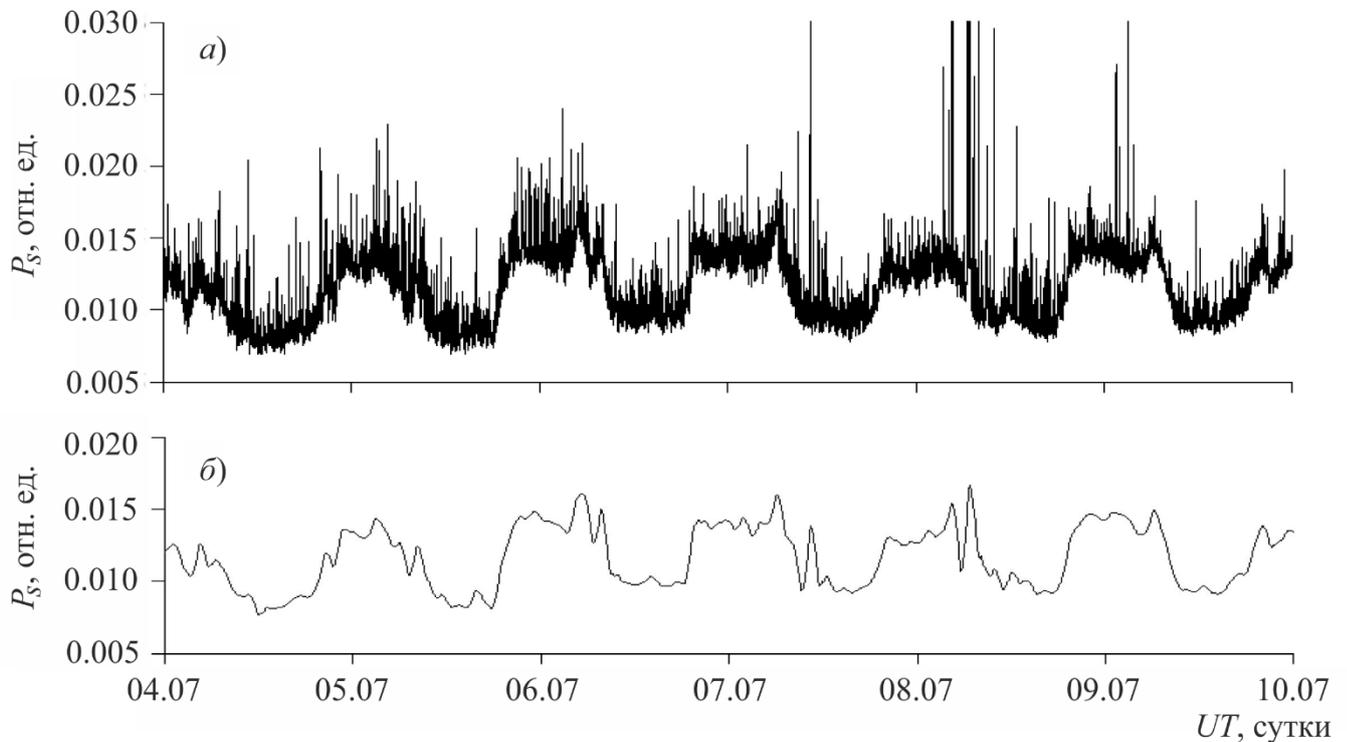


Рисунок 2.14 – Фрагмент данных геоакустической эмиссии в диапазоне частот от 2.0 до 6.5 кГц в период с 04.07.2006 по 10.07.2006 до (а) и после (б) очистки от мешающих шумов. P_s – накопленное за 1 с акустическое давление

В результате анализа периодограмм фрагментов данных без сильных возмущений было установлено, что периодичность суточной вариации составляет 24 ч с точностью 1 ч (рисунок 2.15). Других периодических составляющих выделено не было. Невысокая точность определения периода была обусловлена достаточно малым по продолжительности фрагментом данных (около 11 суток). К сожалению, выделить участок большей длительности не представлялось возможным из-за наличия мощных аномалий, обусловленных активизацией деформационного процесса или плохими метеоусловиями (ветер более 6 м/с, наличие осадков).

Для уточнения периода суточной вариации было проведено сравнение геоакустического сигнала с эталонными синусоидами, имеющими периоды,

соответствующие наиболее мощным суточным приливным волнам: лунной деклинационной волне ${}^m K_1$ (период 23.93 ч), солнечной главной P_1 (период 24.07 ч), лунной главной O_1 (период 25.82 ч) [Сидоренков, 2002], и с периодом ровно 24 ч. Для анализа использовались участки данных длительностью 30 суток. Исследуемый и эталонный сигнал накладывались друг на друга, рассчитывалась взаимная корреляционная функция за последние (тридцатые) сутки, после чего оценивался сдвиг сигналов относительно друг друга. В результате было установлено, что периодичность суточной вариации геоакустической эмиссии составляет ровно 24 ч. Следует отметить, что в работе [Салтыков и др., 1997] для выделения периодических компонент в высокочастотных сейсмических шумах использовалась похожая методика генерации эталонного сигнала.

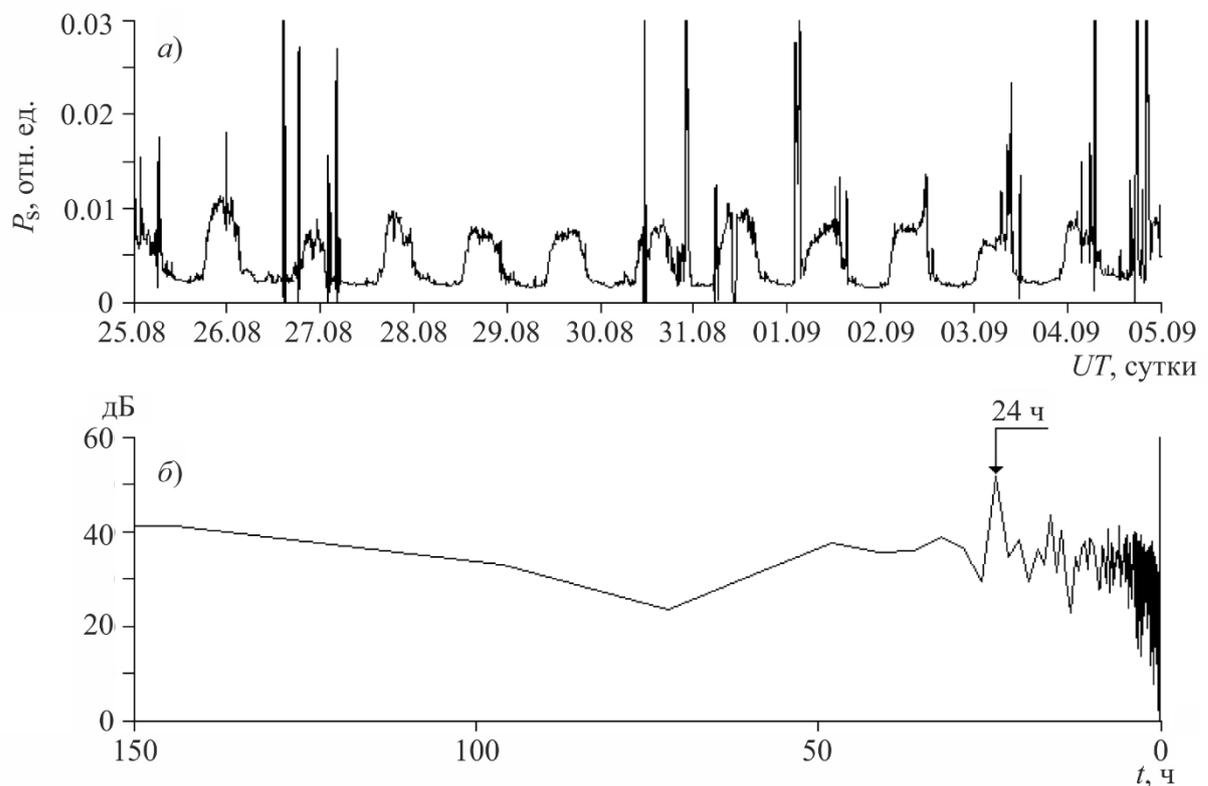


Рисунок 2.15 – Фрагмент данных геоакустической эмиссии в диапазоне частот от 2.0 до 6.5 кГц в период с 25.08.2007 по 05.09.2007 (а) и его периодограмма (б)

Исследование суточного хода высокочастотной ГАЭ проводилось в период с января 2006 г. по сентябрь 2013 г. Использовалась следующая методика. Очищенный сигнал центрировался, после чего просматривался полусуточным окном,

в котором рассчитывалось математическое ожидание ряда. Наличием суточной вариации считалась смена знака математического ожидания не менее 5 раз подряд в 72-часовом временном окне с шагом 12 ч для всего ряда (т.е. наличие периодичности не менее 3 суток) [Солодчук, 2012]. В результате было установлено, что суточная вариация наблюдается в течение всего времени с незначительными перерывами, но при этом регистрируются периоды, когда она наиболее ярко выражена, т.е. амплитуда вариации существенно увеличивается. Для выявления таких периодов при анализе было введено пороговое ограничение. Для каждого сезона с близкими среднесуточными значениями геоакустической эмиссии в качестве порога выбиралось минимальное математическое ожидание, полученное в полусуточном окне. Если установленный порог был превышен по модулю более чем в два раза в обоих 12-ти часовых фрагментах, то считалось, что суточный ход эмиссии ярко выражен. Амплитуда и фаза суточной вариации определялись сравнением исходного сигнала с эталонной синусоидой с периодом 24 ч [Солодчук, 2012]. Таким образом, было установлено, что суточная составляющая наиболее ярко наблюдается в летние периоды (таблица 2.1), когда устанавливается среднесуточная температура не ниже 10°C , и достаточно резко пропадает в сентябре, при снижении температуры после продолжительных осенних дождей. При этом наблюдается связь именно с температурой воздуха, так как в целом активность геоакустической эмиссии, максимум которой приходится как раз на осенние месяцы [Марапулец, Шевцов, 2012], после снижения амплитуды суточной составляющей оставалась достаточно высокой.

В результате анализа связи суточной вариации геоакустической эмиссии с землетрясениями и метеорологическими величинами были выявлены случаи, когда амплитуда вариации значительно увеличивалась или уменьшалась. В эти периоды рассматривались наличие сейсмических событий, а также сильного ветра, дождя, резких скачков атмосферного давления и температуры. Было установлено [Марапулец, Солодчук, 2016], что в 30 случаях из 163 (18.40%) амплитуда суточной составляющей эмиссии существенно изменялась в трехсуточном временном интервале перед землетрясениями, в 19 случаях из 163 (11.66%) – после. При анализе

рассматривались землетрясения с энергетическими классами $K_s \geq 11.0$ на расстоянии до 350 км. Таким образом, почти в 85% случаях связь между изменениями амплитуды суточного хода и сейсмическими событиями не была выявлена, а в остальных 15% случаях резкое изменение амплитуды суточной составляющей происходило при существенных вариациях температуры воздуха.

Таблица 2.1 – Периоды наличия ярко выраженного суточного хода

Год	Период
2006	27 июня – 10 сентября
2007	16 июля – 17 сентября
2008	10 августа – 3 сентября
2009	06 июля – 16 июля, 01 августа – 28 августа
2010	16 июня – 31 августа
2011	19 июля – 07 сентября
2012	15 июня – 12 августа
2013	12 июля – 11 сентября

Связи между амплитудой суточного хода эмиссии и наличием осадков, усилением ветра и резким изменением атмосферного давления установлено не было, за исключением случаев, когда после продолжительных осенних дождей в сентябре амплитуда суточной составляющей резко уменьшалась, но в этот период одновременно уменьшалась и среднесуточная температура воздуха.

В результате корреляционного анализа между суточной составляющей геоакустической эмиссии и вариациями температуры воздуха была выявлена тесная связь. Коэффициенты корреляции в зависимости от выбранного временного периода варьировались от 0.85 до 0.97 при уровне значимости 0.05 [Марапулец и др., 2013]. На рисунке 2.16а, в видно, что формы суточных вариаций температуры воздуха T и акустического давления P_s практически совпадают, при этом наблюдается небольшая задержка хода эмиссии по времени. Анализ данных, проведенный с учетом измерения температуры воды в августе 2013 г. (рисунок 2.16б), показал, что

при прогреве воды в озере возле датчика геоакустической эмиссии наблюдаются изменения формы суточной составляющей акустического давления P_s на стадии уменьшения после максимальных значений. При этом видно, что изменение температуры воды может оказывать влияние на форму суточной вариации эмиссии, но не обуславливает ее появление (вкладка на рисунке 2.16).

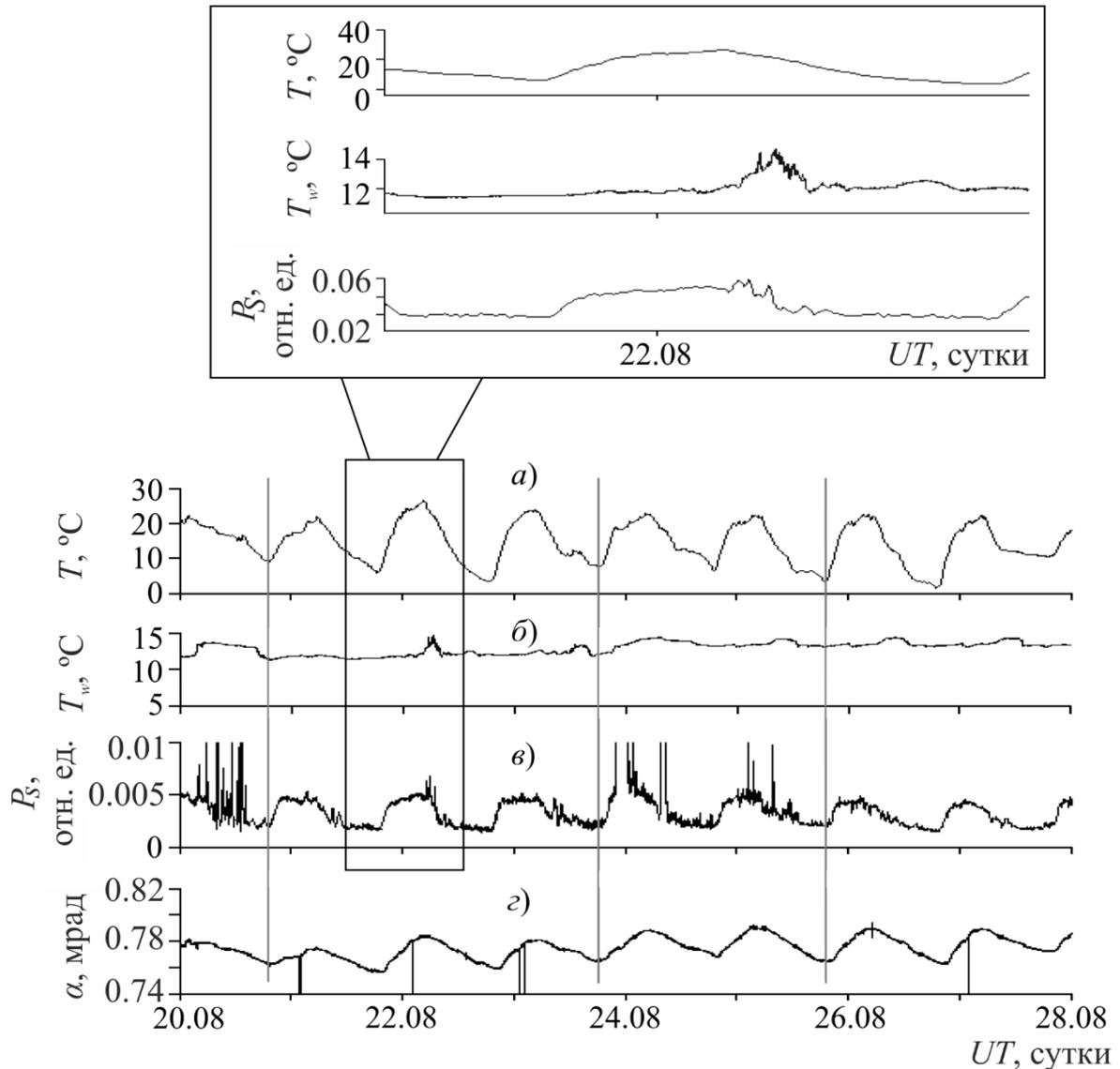


Рисунок 2.16 – Фрагмент регистрации температуры воздуха T (а), температуры воды в озере T_w (б), накопленного на секундном интервале акустического давления P_s в диапазоне частот от 2.0 до 6.5 кГц (в), наклона земной поверхности α (г) в период с 20 по 28 августа 2013 г. Вертикальными линиями отмечено начало роста суточной температуры воздуха. Во вкладке сверху показан выделенный в прямоугольник участок

Таким образом, наиболее вероятной причиной выявленной связи между суточными вариациями температуры воздуха и геоакустической эмиссии является влияние суточной разницы температур на приповерхностные осадочные породы, в которых генерируется эмиссия, т.е. термодформации пород [Марапулец, Солодчук, 2016]. Такие эффекты при регистрации геоакустических сигналов хорошо известны и наблюдаются, как при исследовании высокочастотного сейсмического шума [Салтыков и др., 1997; Салтыков, 2016], так и акустических сигналов в диапазоне от 25 до 30 кГц [Acoustic emission ..., 2002; «Storms of crustal stress» ..., 2010]. Для подтверждения этих эффектов в пункте наблюдений и был установлен инклинометр (см. п. 2.1). В результате спектрального анализа (рисунок 2.17) величин наклона земной поверхности вдоль оси Север–Юг, перпендикулярной направлению на систему направленных гидрофонов, были выявлены суточные и полусуточные составляющие с периодами 24 и 12 ч соответственно.

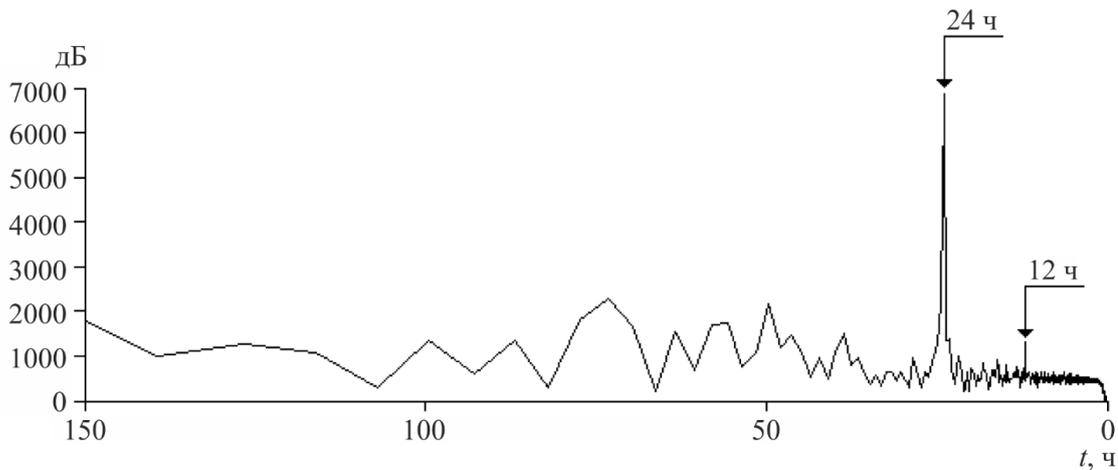


Рисунок 2.17 – Периодограмма наклонов земной поверхности за период с 01 июня по 30 сентября 2013 г

Для более точного определения периода суточной вариации наклона земной поверхности использовалась та же методика, что и при анализе геоакустических данных [Марапулец, Солодчук, 2016]. В результате установлено, что период вариации равен 24 ч, а время, при котором она наиболее ярко выражена (июнь–сентябрь), практически совпало с периодом, выявленным в суточных составляющих геоакустической эмиссии при установившейся максимальной среднесуточной

температуре. Это подтверждает общую термодформационную природу суточных вариаций геоакустической эмиссии и наклонов земной поверхности. Следует отметить, что одинаковое поведение суточных составляющих в двух разнородных геофизических полях (рисунок 2.16в, г) не может быть обусловлено помеховым воздействием электромагнитной природы или плохим качеством электрического питания, так как использовались разные системы регистрации с отдельным стабилизированным питанием. В сравнении с периодической вариацией температуры воздуха наблюдается фазовый сдвиг суточной составляющей геоакустической эмиссии на 1 ч, а наклонов земной поверхности – на 2 ч (рисунок 2.16а, в, г). Вероятнее всего это обусловлено особенностями прогрева пород в местах установки датчиков регистрируемых полей.

Спектральный анализ данных инклинометра, полученных в летний период, показал, что приливные волны, в частности главная лунная волна O_1 , амплитуда которой является максимальной по сравнению с другими приливными волнами [Сидоренков, 2002], на фоне суточной вариации 24 ч, не выделяются. Это может быть обусловлено тем, что измерения проводятся в рыхлых осадочных породах, толщина слоя которых в пункте регистрации составляет до 50 м [Купцов и др., 2005]. Такие породы находятся в постоянном пластическом течении, что подтверждается результатами регистрации деформаций в пункте наблюдений «Карымшина», находящемся на расстоянии 20 км от места регистрации эмиссии [Деформационные и акустические предвестники ..., 2007]. Осадочные породы там имеют такую же толщину слоя [Купцов и др., 2005], а вариации относительной деформации в сутки, измеренные лазерным деформографом-интерферометром, составляют 10^{-7} , а в периоды активизации деформаций и 10^{-6} [Одновременный отклик ..., 2011]. Естественно, обнаружить вариации, обусловленные приливами с деформациями порядка 10^{-8} на их фоне, практически невозможно. Приливные волны в геоакустических данных на Камчатке выявляются при измерениях в более прочных породах и глубоких скважинах [Салтыков и др., 1997; Гаврилов и др., 2006; Салтыков, Кугаенко, 2007].

В результате спектрального анализа данных инклинометра за весь 2013 г. были выявлены гармоники, соответствующие периодам главных лунных суточной O_1 и полусуточной M_2 волн (рисунок 2.18). Они наблюдались с начала апреля до середины мая, когда в месте установки наклономера высота снежного покрова составляла около 2 м. Под такой снежной массой происходит уплотнение промерзшего верхнего слоя осадочных пород, поэтому в этот период среда наиболее твердая. В данных высокочастотной геоакустической эмиссии в это время гармоник, соответствующих приливным волнам, выявлено не было.

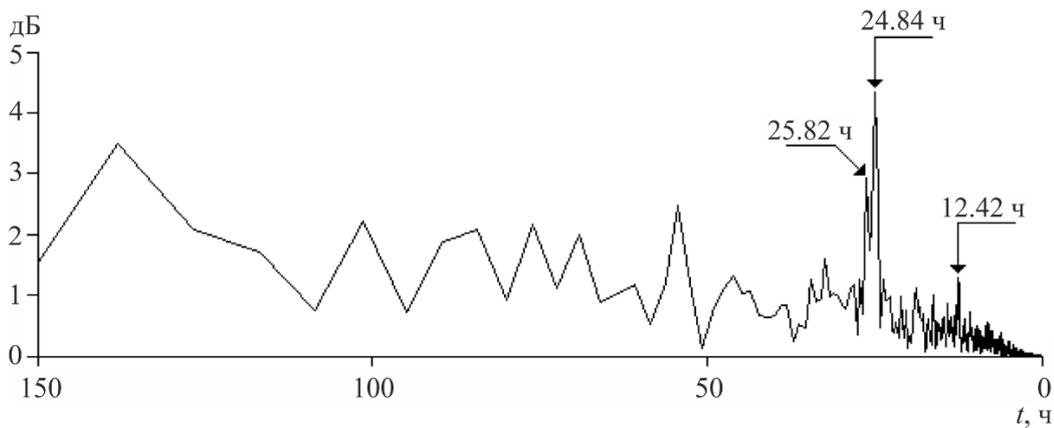


Рисунок 2.18 – Периодограмма наклонов земной поверхности за период с 01 апреля по 15 мая 2013 г.

Выводы по главе 2

Измерения высокочастотной геоакустической эмиссии на Камчатке проводятся с помощью аппаратно-программного комплекса, в состав которого входят несколько приемных регистрирующих систем, установленных у дна природного водоема, и специальное программное обеспечение. Использование системы направленных гидрофонов обеспечивает возможность проведения исследований в широком диапазоне звуковых частот от единиц герц до первых десятков килогерц. Применение комбинированного приемника позволяет с высокой точностью определять направление на источник излучения и производить анализ распределения акустической активности по направлениям.

Анализ геоакустических шумов в широком диапазоне частот показал, что все их разнообразие складывается из различных комбинаций релаксационных импульсов различной амплитуды и длительности, с ударным возбуждением и частотой заполнения от сотен герц до десятков килогерц. Частота их следования составляет от 0.1 до 0.5 импульсов в секунду в спокойные периоды и может достигать десятков и даже сотен в секунду в моменты активизации пластического процесса, в том числе и перед землетрясениями. Наблюдаются как отдельные импульсы, так и их группы, сливающиеся в непрерывный сигнал. Все они имеют специфичную форму и легко выделяются на фоне помех, обусловленных плохими метеоусловиями и техногенными воздействиями.

В спокойные периоды геоакустический сигнал состоит из редких, незначительных по амплитуде импульсов, его спектр сглажен и имеет явный спад с ростом частоты. Во время активизации деформационного процесса, особенно на заключительной стадии подготовки землетрясений, наблюдается увеличение амплитуды импульсов и рост их числа в единицу времени. В спектре сигналов в такие периоды наблюдается заметное повышение уровня шумов в килогерцовом диапазоне частот.

По изменениям интегрального сигнала эмиссии в разных частотных поддиапазонах можно оперативно выявлять аномалии, которые могут быть обусловлены ростом скорости деформации пород, а также погодными и техногенными факторами. Наиболее ярко реакция сигнала геоакустического излучения на деформационные возмущения проявляется в полосе частот свыше 2 кГц.

В результате анализа фоновых характеристик высокочастотной ГАЭ, установлено, что в сигнале эмиссии присутствует суточная вариация с периодом 24 ч, обусловленная термдеформациями пород в пункте наблюдений. Она наиболее ярко выражена в летние месяцы, когда среднесуточная температура воздуха устанавливается не ниже 10° С. Периодических составляющих, соответствующих суточным и полусуточным приливным волнам, а также аномальных изменений суточной вариации эмиссии перед сильными землетрясениями не выявлено.

ГЛАВА 3. НАПРАВЛЕННОСТЬ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ГЕОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

В результате исследований высокочастотной геоакустической эмиссии установлено, что ее характер изменяется при активизации деформационных процессов, в частности связанных с землетрясениями. Так, в работе [Купцов, 2005] показано, что примерно за сутки перед сильными сейсмическим событиям (с магнитудой более 4.0) наблюдалось многократное увеличение амплитуды сигнала над фоновым уровнем в высокочастотной области спектра, продолжающееся в течение нескольких часов. Последующие работы [Деформационные и акустические предвестники ..., 2007; Мищенко, 2011; Отклик геоакустической эмиссии ..., 2012] расширили до нескольких суток временной интервал, в котором регистрировались предшествующие землетрясениям возмущения геоакустического излучения. Статистический анализ, использующий метод наложения эпох [Мищенко, 2011], показал, что более 45% возмущений эмиссии, выражающихся в виде резкого продолжительного повышения амплитуды сигнала или периодически появляющихся импульсов, возникают в 2.5 суточном интервале перед землетрясениями с энергетическим классом не менее 9.0.

Изменения высокочастотной геоакустической эмиссии, предваряющие землетрясения, также наблюдаются и в ее азимутальном распределении. В результате исследований [Марапулец, Шевцов, 2012; Изучение высокочастотной геоакустической эмиссии ..., 2009; Шевцов и др., 2010; Марапулец, Щербина, 2013], выявлено, что в суточном временном интервале перед сильными сейсмическими событиями возникают ярко выраженные максимумы в направленности продольных акустических колебаний. По их положениям можно определить ориентацию главной оси сжатия, характеризующей деформационный процесс, сопровождающий готовящееся землетрясение. Дальнейший анализ азимутального распределения высокочастотного геоакустического излучения показал наличие максимумов

в направленности эмиссии не только при подготовке сейсмических событий, но и после них [Марапулец и др., 2016; Marapulets et al., 2016].

3.1 Теоретические основы определения направления сигналов высокочастотной геоакустической эмиссии

В работах [Купцов, 2005; Купцов и др., 2005; Деформационные и акустические предвестники ..., 2007; Аномалия высокочастотных сигналов ..., 2008] наблюдались аномальные изменения в характере высокочастотного геоакустического излучения на заключительной стадии подготовки землетрясений. Эту стадию можно характеризовать быстрым ростом упругих напряжений, приводящих к лавинному трещинообразованию и подготовке магистрального разрыва, т.е. очага землетрясения [Соболев, Пономарев, 2003]. При этом трещины и подвижки различной величины могут образовываться на территориях, значительно превышающих область очага [Пережогин, Шевцов, 2009].

Такие территории характеризуются повышенным уровнем геоакустической эмиссии. В работах [Добровольский и др., 1980; Добровольский, 2009] предложено соотношение для оценки их радиуса:

$$R = 10^{0.43M},$$

где M – магнитуда землетрясения.

Радиус описывает зоны появления акустических возмущений при деформациях горных пород 10^{-8} .

В работе [Пережогин, Шевцов, 2009] произведены расчеты зон геоакустической эмиссии, определяемой уровнем деформаций земной коры, и исследования зон дилатансии (разуплотнения горных пород) для случая двойной силы, как возможного источника напряжений в очаге землетрясения. Установлено, что зоны геоакустической эмиссии по уровню относительных деформаций больше 10^{-8} простираются на расстояние более 100 км от эпицентра

землетрясения (рисунок 3.1). Этим объясняется появление акустических эффектов на большом удалении от области подготовки землетрясения.

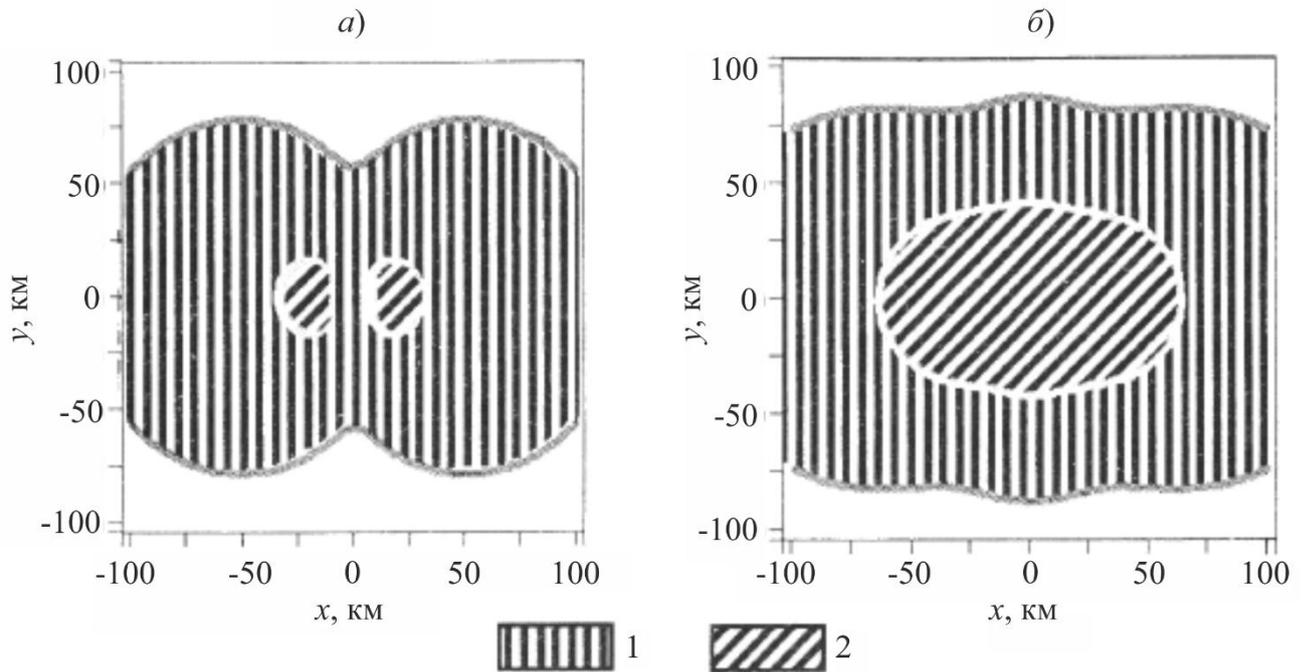


Рисунок 3.1 – Уровни сдвиговых деформаций в случае двух типов источников напряжений в виде сил: простой (а) и двойной без момента (б). 1 – относительные деформации 10^{-8} – 10^{-7} , 2 – относительные деформации более 10^{-7} [Пережогин, Шевцов, 2009]

В зонах геоакустической эмиссии преобладают сдвиговые источники, поскольку прочность пород по отношению к касательным напряжениям меньше, чем к сжатию. Согласно [Виноградов, 1976а, 1976б; Физическая природа разрыва ..., 1980; Шамина, Понятовская, 1993], преимущественная ориентация таких источников определяется направлением максимальных касательных напряжений, ориентированных в основном под углом 45° к оси наибольшего сжатия. При этом максимумы продольных акустических колебаний соответствуют направлениям, перпендикулярным этой оси для волны сжатия и совпадающим с ней для волны разряжения. Диаграммы направленности акустических колебаний сдвиговых источников схематично представлены на рисунке 3.2. В каждой точке наблюдений они будут создавать сложную картину анизотропии направленности и поляризации акустического излучения [Пережогин, Шевцов, 2009]. Установка приемника

геоакустической эмиссии в воде обеспечит естественную селекцию продольных колебаний и при определении направленности эмиссии позволит ограничиться только их рассмотрением.

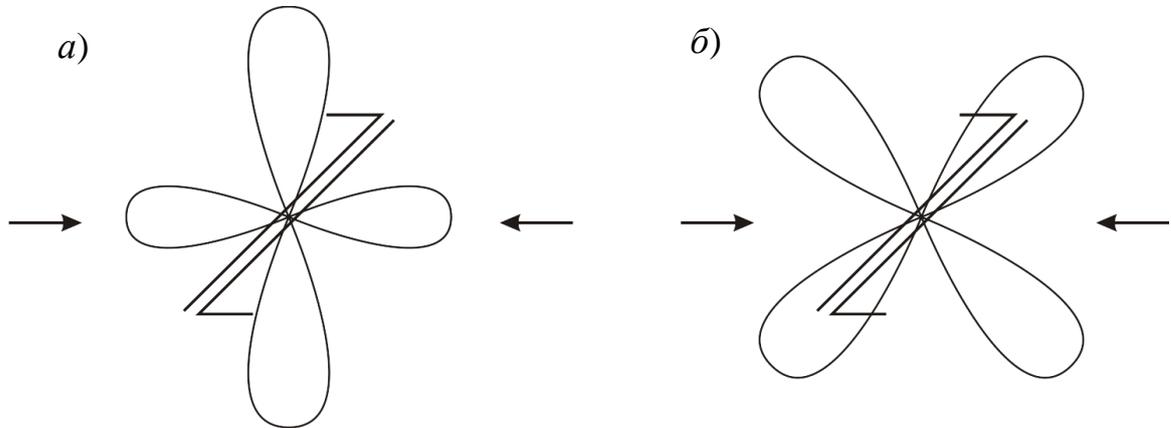


Рисунок 3.2 – Диаграммы направленности продольных (а) и поперечных (б) акустических колебаний сдвиговых источников. Стрелками показана ось наибольшего сжатия

В периоды отсутствия деформационных возмущений ориентация сдвиговых источников будет произвольной при условии однородной структуры пород в месте регистрации и, соответственно, достаточно равномерном распределении источников излучения в ней. Диаграмма направленности акустического излучения будет соответствовать примеру, представленному на рисунке 3.3а.

В периоды активизации пластического процесса, например, при подготовке землетрясений, в зоне геоакустической эмиссии появится достаточно большое число одинаково сориентированных под действием общих сил сдвиговых источников (рисунок 3.3б). С учетом диаграммы направленности продольных колебаний сдвиговых источников (рисунок 3.2а), в точке приема будут преимущественно регистрироваться сигналы с направлений, совпадающих с осью сжатия или перпендикулярных ей.

В реальных условиях наблюдения при возникновении сдвиговых источников в существенно неоднородных по структуре и прочности осадочных породах диаграмма распределения интенсивности геоакустического излучения

по направлениям в точке приема регистрируемого геоакустического сигнала может приобрести значительную асимметрию [Щербина, 2010].

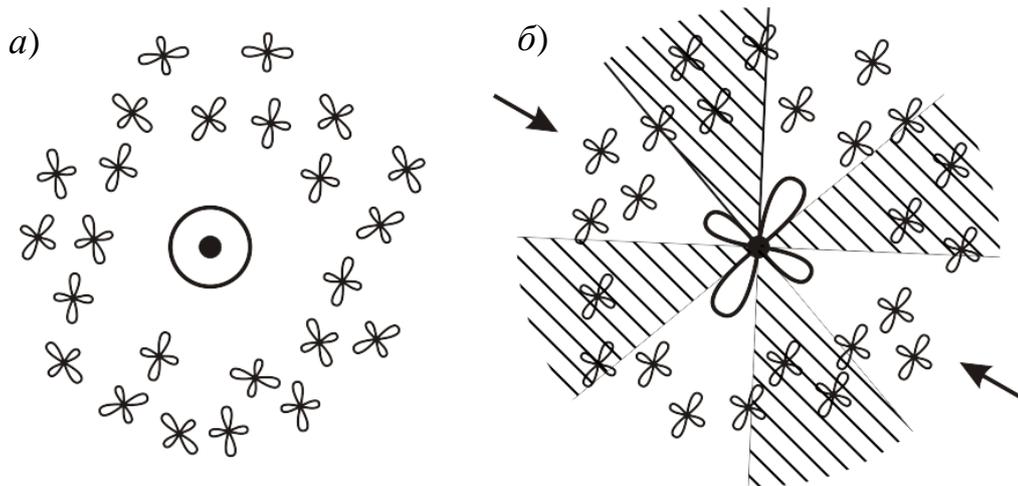


Рисунок 3.3 – Примеры диаграмм распределения интенсивности геоакустического излучения по направлениям в точке приема при отсутствии деформационных возмущений (а), при их наличии (б). На рисунках толстой линией обозначены диаграммы распределения интенсивности геоакустического излучения по направлениям в точках приема, штриховкой – зоны расположения источников сигнала, не излучающих сигнал в направлении приемника. Стрелками отмечена ось наибольшего сжатия [Щербина, 2010]

Направление максимума акустического сигнала имеет отклонение от направления на источник напряжений в зависимости от расположения точки наблюдений. Согласно данным экспериментов [Купцов и др., 2005; Геоакустическая локация ..., 2006] отклонение пеленга акустических сигналов от направления на область подготовки землетрясения находится в диапазоне от 0° до 52° , что подтверждают результаты расчетов [Пережогин, Шевцов, 2009].

Как было показано выше, регистрация потока импульсов геоакустической эмиссии производится приемными акустическими системами, размещенными у дна водоема (п. 2.1). Из-за отсутствия упругости формы в жидкостях акустическое поле в них имеет более простой вид по сравнению с полем в твердой среде. При описании волнового движения в жидкости вместо напряжений σ и смещения u используются изменение давления P или плотности ρ и вектор скорости колебательного

движения \mathbf{V} [Ермолов и др., 1991]. При этом колебания представляют собой смещения частиц среды от положения равновесия. Следует отметить, что под «частицами среды» понимается физически бесконечно малый объем среды, т.е. объем, достаточно малый по сравнению с объемом тела, но большой по сравнению с межмолекулярными расстояниями [Гордиенко, 2007]. Движение жидкости в векторной форме определяется уравнением Эйлера [Сташкевич, 1966; Гордиенко, 2007]:

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V}, \nabla) \mathbf{V} = -\frac{1}{\rho} \text{grad } P \quad (3.1)$$

или в проекциях на координатные оси [Сташкевич, 1966]:

$$\frac{\partial V_x}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x}, \quad \frac{\partial V_y}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y}, \quad \frac{\partial V_z}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z}. \quad (3.2)$$

Акустическое давление можно оценить через потенциал колебательной скорости $\Phi(x, y, z, t)$, который связан с колебательной скоростью соотношением $\mathbf{V} = -\text{grad } \Phi$ [Сташкевич, 1966]:

$$P = \rho \frac{\partial \Phi}{\partial t}. \quad (3.3)$$

Для оценки скорости распространения акустических волн используется формула [Сташкевич, 1966]:

$$c = \sqrt{\frac{\partial P}{\partial \rho}}. \quad (3.4)$$

Таким образом, с учетом (3.1) – (3.3), можно сделать вывод о том, что пространственное распределение звукового давления тождественно распределению потенциала колебательной скорости. Если известна функция Φ , можно определить ее градиенты в любых направлениях, получить сведения о структуре векторных величин поля (колебательной скорости, смещения, ускорения, потока акустической мощности) и, соответственно, определить направление

движения волны. На практике, измерить акустическое давление гораздо проще, чем колебательную скорость. Поэтому зачастую для восстановления вектора \mathbf{V} применяют протяженные системы измерения акустического давления P (антенные решетки). При приеме широкополосных сигналов система также должна быть квазинепрерывной в некоторой области пространства [Гордиенко, 2007]. Небольшие размеры водоема, в котором производится регистрация сигналов геоакустического излучения в широком диапазоне частот, накладывает определенные ограничения на размер таких систем и делает их использование довольно сложным. Альтернативным подходом к определению направления прихода звуковой волны является использование комбинированных приемников, которые синхронно регистрируют акустическое давление $P(t)$ и три взаимно ортогональных компоненты его градиента $\nabla P_x(t)$, $\nabla P_y(t)$, $\nabla P_z(t)$, равные проекциям вектора градиента давления на соответствующие оси координат. Применяя векторно-фазовые методы к этим четырем сигналам, можно восстановить пространственно-временное распределение вектора колебательной скорости \mathbf{V} частиц среды в акустической волне.

Концепция векторно-фазовых методов базируется на основном правиле гидродинамики, которое заключается в том, что для полного описания волнового движения в среде необходимы одна векторная и две скалярные характеристики поля [Гордиенко, 2007]. В качестве векторной в данном случае выступают три взаимно ортогональные компоненты градиента акустического давления, скалярных – звуковое давление и плотность среды, при этом плотность среды и скорость распространения акустических волн в ней предполагаются известными. Суть подхода заключается в следующем. Пусть в окрестности точки M_0 , имеющей координаты x_0, y_0, z_0 измеряется звуковое давление $P(M)$. Разложим функцию $P(M) = P(x, y, z, t)$ в ряд Тейлора с центром в точке M_0 :

$$P(x, y, z) = P(x_0, y_0, z_0) + \left[(x - x_0) \frac{\partial P(M_0)}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial P(M_0)}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial P(M_0)}{\partial z} \right] + \dots \quad (3.5)$$

Первый член суммы в правой части формулы представляет звуковое давление в точке M_0 и является нулевым приближением функции $P(M)$. Учет второго члена дает первое приближение функции $P(M)$ и т.д. Таким образом, измеряя звуковое давление и его пространственные производные в точке M_0 можно восстановить функцию $P(M)$. Для определения направления на источник плоской звуковой волны достаточно знать величины звукового давления и его пространственных производных в точке M_0 , т. е. величины, входящие в первые два члена ряда (3.5) [Гордиенко, 2007].

Существует несколько методов определения направления на источник звука, применяющихся в рамках векторно-фазового подхода. Наибольшее распространение получили амплитудный и разностно-фазовый методы [Гордиенко, 2007]. В первом методе рассматриваются дальнее поле детерминированного источника в однородной безграничной среде, колебания частиц которой происходят в направлении распространения акустической волны. Зная амплитуды компонентов P , V_x , V_y , и V_z сигнала, полярный угол ϑ и азимут φ направления на источник можно найти, используя соотношения:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{V_y}{V_x}, \quad \operatorname{tg} \vartheta = \pm \sqrt{\frac{V_x^2 + V_y^2}{V_z^2}}. \quad (3.6)$$

Неоднозначность определения направления, возникающая в силу симметрии характеристик направленности векторных каналов, устраняется применением канала давления. Знак перед квадратным корнем при нахождении полярного угла (3.6) определяется значением разности фаз или знаком взаимной корреляции между каналами давления и колебательной скорости, или градиента давления в некоторых конструкциях векторных приемников (таблица 3.1).

Также азимут может быть рассчитан по формуле:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{W_{R_y}}{W_{R_x}},$$

где W_{R_x} и W_{R_y} - проекции вектора потока акустической мощности на соответствующие координатные оси.

$$W = \frac{1}{\tau} \int_{\tau_0}^{\tau} P(t) \mathbf{V}(t) dt, \quad \mathbf{I}(t) = P(t) \mathbf{V}(t) \quad - \text{ вектор Умова-Пойнтинга} - \text{ значение}$$

интенсивности звука.

В этом случае неоднозначность определения пеленга исключается автоматически, т.к. в знаке потока акустической мощности уже заложена информация о направлении прихода сигнала [Гордиенко, 2007].

Таблица 3.1 – Устранение неоднозначности определения направления прихода звуковой волны

Параметры поля	Знаки корреляции по квадрантам			
	I	II	III	IV
P, V_x	+	-	-	+
P, V_y	+	+	-	-
V_x, V_y	+	-	+	-

При определении направления на источник звука разностно-фазовым методом одна из проекций колебательной скорости сдвигается на 90° , после чего суммируется со второй ортогональной проекцией. Получившаяся разность фаз между акустическим давлением и сформированным сигналом будет в точности соответствовать пеленгу на источник.

Проиллюстрировать данный метод можно, рассматривая гармоническую волну со средней частотой ω в комплексном представлении [Гордиенко, 2007]. В дальнем поле источника, находящегося под углом φ к оси X в горизонтальной плоскости, выполняются соотношения:

$$\begin{aligned} P &= P_0 \exp j(\omega t - kr); \\ V_x &= P_0 \cos \varphi \exp j(\omega t - kr); \\ V_y &= P_0 \sin \varphi \exp j(\omega t - kr). \end{aligned}$$

где k – волновое число; r – расстояние до точки в пространстве.

В таком представлении сдвиг сигнала V_y по фазе на $\pi/2$ эквивалентен умножению его на мнимую единицу ($j^2 = -1$).

Тогда новый сформированный сигнал можно представить в виде:

$$\begin{aligned} V &= V_x + jV_y = P_0 \cos \varphi \exp j(\omega t - kr) + jP_0 \sin \varphi \exp j(\omega t - kr) = \\ &= P_0 \exp j(\omega t - kr)(\cos \varphi + j \sin \varphi) = P_0 \exp j(\omega t - kr + \varphi). \end{aligned}$$

Этот сигнал представляет собой выражение для поля давления со сдвигом по фазе на угол φ [Гордиенко, 2007].

Исследование направленных свойств высокочастотной геоакустической эмиссии проводится на основе данных, полученных гидроакустической системой, построенной на базе комбинированного приемника. Амплитуда зарегистрированных импульсов существенно превышает уровень шумов, поэтому для исследования направленности их распределения удобно применять амплитудный метод, согласно которому точки сигнала отображаются в декартовой системе координат (рисунок 3.4). При этом отсчеты отдельных импульсов группируются в ограниченной области, которую можно описать эллипсом (рисунок 3.5).

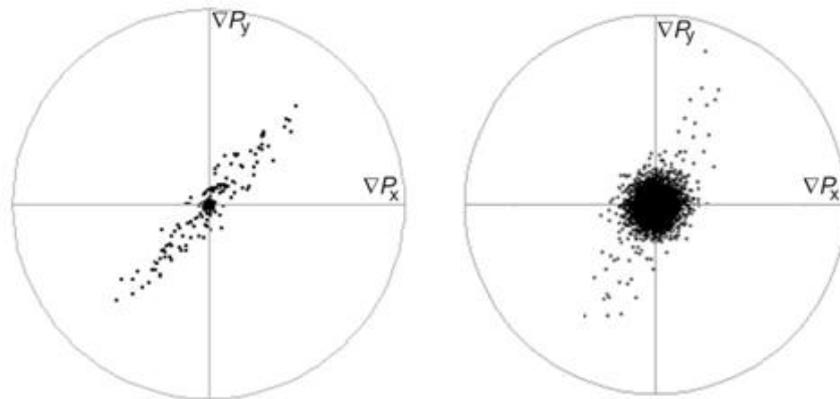


Рисунок 3.4 – Примеры сигналов с разным уровнем шумов [Марапулец, Щербина, 2008]

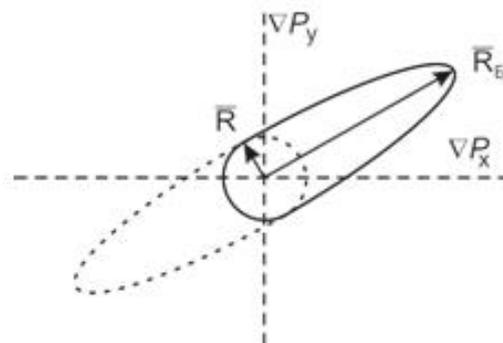


Рисунок 3.5 – Описывающий эллипс. R и R_B – малая и большая полуоси эллипса соответственно [Марапулец, Щербина, 2008]

Направление прихода звуковой волны соответствует положению главной оси эллипса. Как было описано выше, неоднозначность направления исключается применением канала давления. Для высокоточного определения пеленга на источник излучения разработан метод автоматизации [Марапулец, Щербина, 2008; Шевцов и др., 2010]. В нем по форме огибающей сигнала определяется его вступление и находится амплитуда импульса, затем в определенном интервале амплитуд dA определяется их направленность. Разработан программный комплекс, реализующий данный метод (рисунок 3.6). Вследствие самоподобия эмиссии рассмотрение импульсов только в выделенном интервале амплитуд является достаточным для исследования направленности геоакустических сигналов [Марапулец, Шевцов, 2012].

3.2 Направленность высокочастотной геоакустической эмиссии в фоновые периоды и при активизации деформационных процессов

При исследованиях направленности акустического излучения используются 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 – азимутальное распределение регистрируемого потока импульсов по направлениям $d\alpha$. При визуализации гистограмма азимутального распределения отображается в полярных координатах, где расстояние от центра координат до точки пространства с углом α равняется значению $D(\alpha, t)$. Также строится трехмерный график азимутального распределения $D(\alpha, t)$ в декартовых координатах, где по оси абсцисс откладывается время, по оси ординат – азимуты, яркость графика характеризует усредненное в 15 минутном окне количество импульсов, зарегистрированных по какому-либо направлению. При построениях углы группируются в интервалы по 5° . На рисунке 3.6 показано окно программы

для записи геоакустического сигнала, автоматического выделения импульсов и определения направления их прихода.

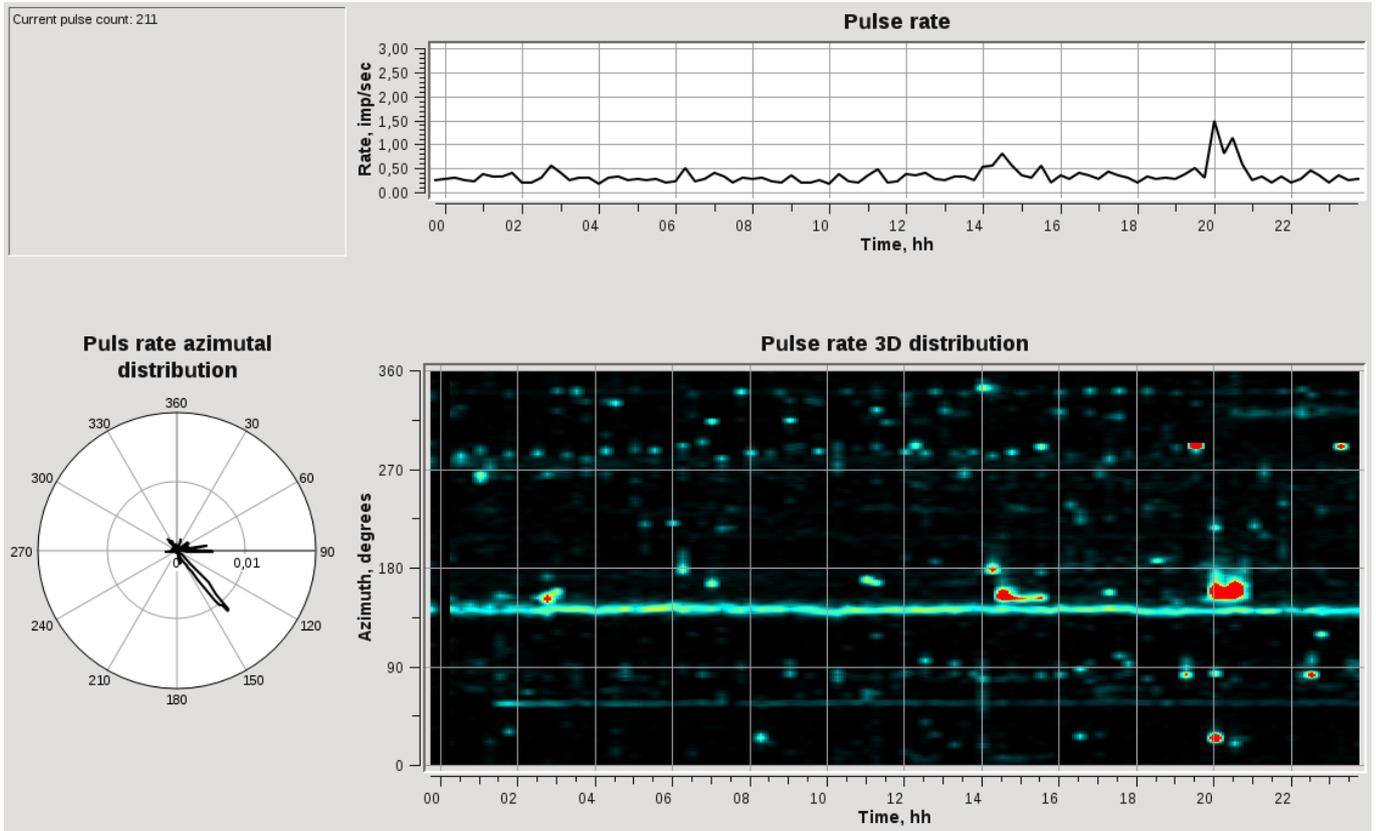


Рисунок 3.6 – Главное окно программы. Акустическая активность $\Omega(t)$ за сутки 06.01.2015 (вверху), диаграмма азимутального распределения $D(\alpha)$ за последние 15 минут записи сигнала (внизу слева), трехмерный график азимутального распределения $D(\alpha, t)$ (внизу справа) за сутки 06.01.2015

Исследования направленности проводились как в фоновые (спокойные) периоды, когда отсутствовали деформационные и метеорологические возмущения, так и во время роста интенсивности эмиссии перед землетрясениями. В результате непрерывных наблюдений в период с августа 2007 года по декабрь 2016 года установлено, что поведение геоакустической активности хорошо аппроксимируется синусоидой (рисунок 3.7), максимум которой приходится на осенние месяцы, а минимум – на весну. Также на фоне плавных сезонных изменений возникают кратковременные (длительностью до нескольких суток) интенсивные возмущения,

обусловленные активизацией деформационных процессов [Отклик геоакустической эмиссии ..., 2012].

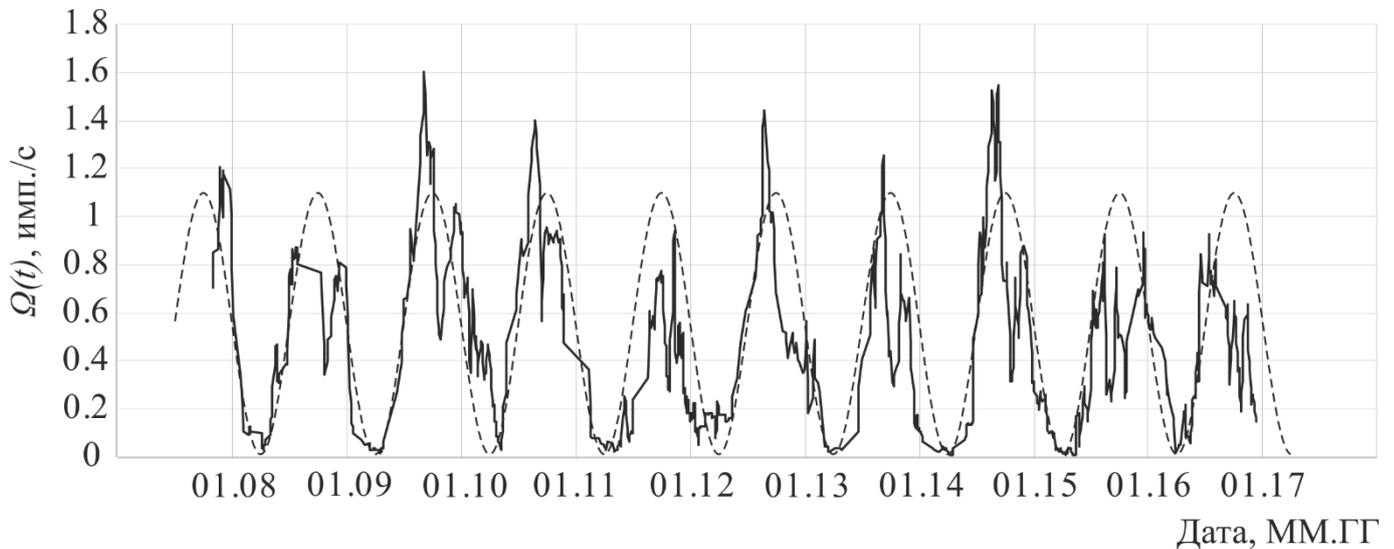


Рисунок 3.7 – Сезонные изменения активности геоакустической эмиссии $\Omega(t)$ (сплошная линия) и график синусоиды для сравнения (пунктирная линия)

В спокойные дни распределение геоакустических импульсов по направлениям достаточно равномерное. В качестве примеров на рисунке 3.8 представлены диаграммы азимутального распределения акустической активности, усредненной в суточном интервале, за периоды: ноябрь 2007 г. – февраль 2008 г. (рисунок 3.8а) и май – июнь 2008 г. (рисунок 3.8б). При построении диаграмм не учитывались дни, когда присутствовали деформационные и атмосферные возмущения. Средняя акустическая активность $\Omega(t)$ в эти периоды составила 0.63 и 0.14 имп./с соответственно [Отклик геоакустической эмиссии ..., 2012].

По рисунку видно, что в обоих случаях регистрируется повышенная активность с юго-восточного и северо-западного направлений, структура лепестков диаграмм во многом повторяется, а отличия в активности, как сказано выше, имеют сезонный характер. По множеству нерегулярно расположенных максимумов излучения можно судить о сложном характере напряжений, действующих в периоды регистрации эмиссии, а по асимметрии их расположения можно сделать вывод о неоднородности свойств среды вокруг точки наблюдений [Отклик геоакустической эмиссии, 2012].

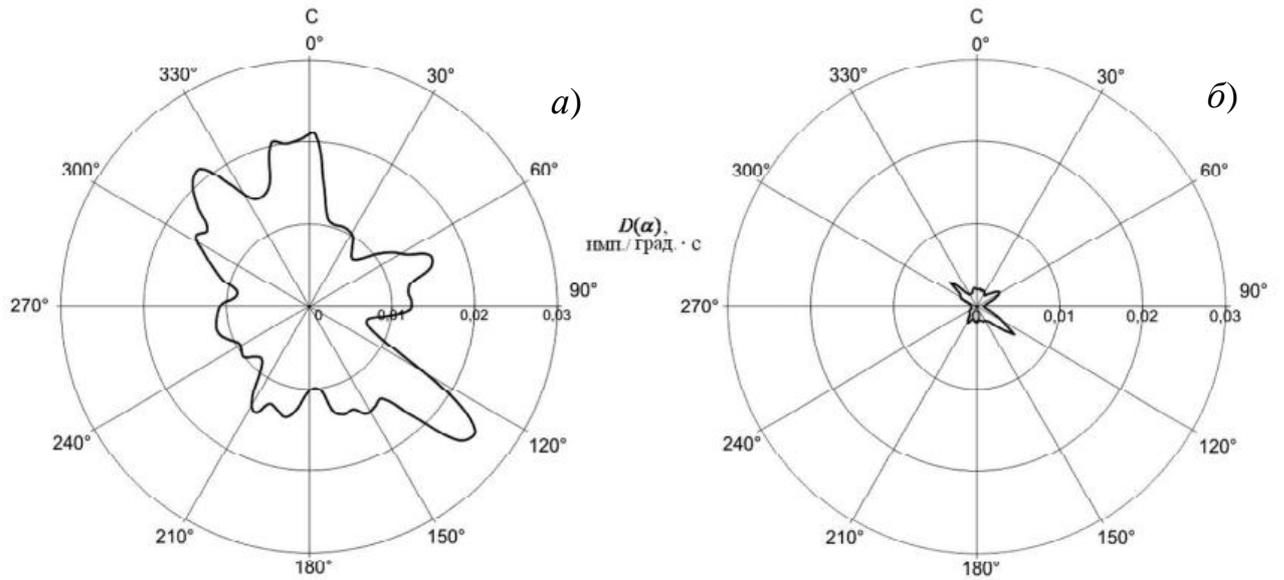


Рисунок 3.8 – Диаграммы азимутального распределения геоакустической активности $D(\alpha)$ в фоновые периоды

На рисунке 3.9 изображены акустическая активность $\Omega(t)$, усредненная раз в секунду, и ее азимутальное распределение $D(\alpha, t)$ 16 и 17 мая 2009 г.

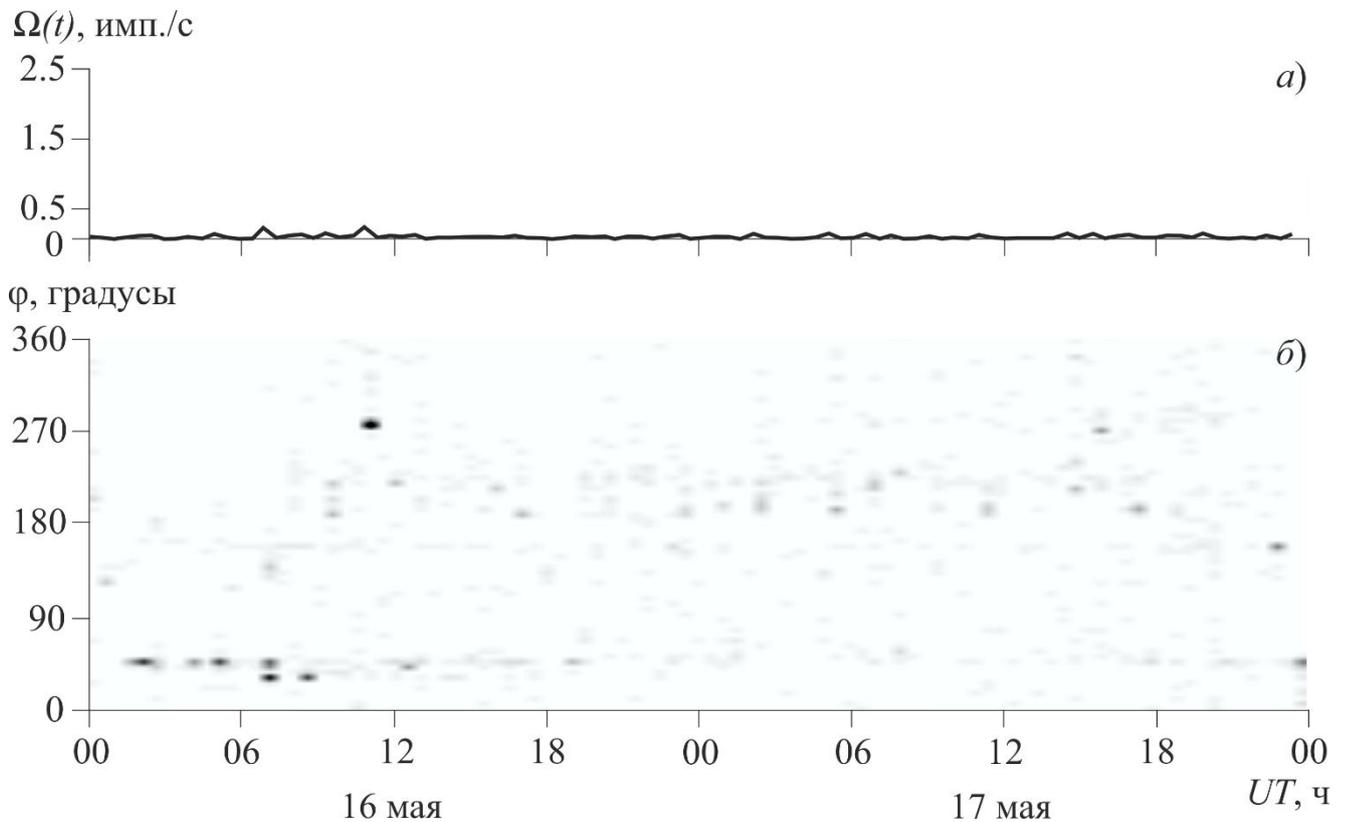


Рисунок 3.9 – Акустическая активность $\Omega(t)$ (а) и ее азимутальное распределение $D(\alpha, t)$ (б) 16 и 17 мая 2009 г.

В эти спокойные дни средний уровень акустической активности не превышал значения 0.01 имп./с. На графике азимутального распределения (рисунок 3.9б) практически не наблюдалось увеличения количества импульсов по отдельным направлениям.

В периоды активизации деформационных процессов, в частности, обусловленных землетрясениями, наблюдается увеличение акустической активности и диаграммы ее азимутального распределения существенно изменяются: в них появляются ярко выраженные максимумы по отдельным направлениям (рисунок 3.10). Рисунок 3.10а иллюстрирует распределение акустической активности 14 декабря 2007 г. перед землетрясением с энергетическим классом $K_s = 11.6$, произошедшим 15 декабря 2007 г. в 9:00 UT на эпицентральной расстоянии $R = 175$ км по азимуту $\varphi = 14^\circ$. Координаты эпицентра: 52.34° N, 160.61° E. На рисунке 3.10б показано распределение направленности геоакустической эмиссии 14 мая 2008 г. перед землетрясением класса $K_s = 11.1$, произошедшим 15 мая 2008 г. в 5:49 UT по азимуту $\varphi = 104^\circ$ на расстоянии $R = 127$ км. Координаты эпицентра: 52.7° N, 160.06° E.

Анализ диаграмм, приведенных на рисунке 3.10 показал, что перед землетрясениями существенно возросла активность с направлений 15° и 30° , которые наблюдались и в спокойные периоды, но практически не выделялись на фоне среднего уровня. В период деформационных возмущений активность этих направлений существенно возросла.

Повышенный уровень активности геоакустического излучения по отдельным направлениям регистрируется как перед сейсмическими событиями, так и в течение некоторого времени после них [Марापалец и др., 2016; Marapulets et al., 2016]. На рисунке 3.11 представлен пример изменения активности эмиссии в окрестности землетрясений, произошедших 13 марта 2016 г. в 18:42 UT (координаты эпицентра: 53.9° N, 159.05° E) с энергетическим классом $K_s = 11.3$ на эпицентральной расстоянии $R = 104$ км по азимуту $\varphi = 31^\circ$ (1 на графике), 14 марта 2016 г. в 12:36 UT (52.82° N, 159.82° E) с $K_s = 9.1$, $R = 108$ км, $\varphi = 100^\circ$ (2 на графике) и 14 марта

2016 г. в 21:50 UT (53.08° N, 160.08° E) с $K_s = 11.2$, $R = 124$ км, $\varphi = 85^\circ$ (3 на графике). По рисунку видно, что наибольшая активность наблюдалась в узком диапазоне направлений от 300° до 320° . Здесь и далее на рисунках стрелками с продолжением в линии указаны моменты землетрясений; φ – азимут.

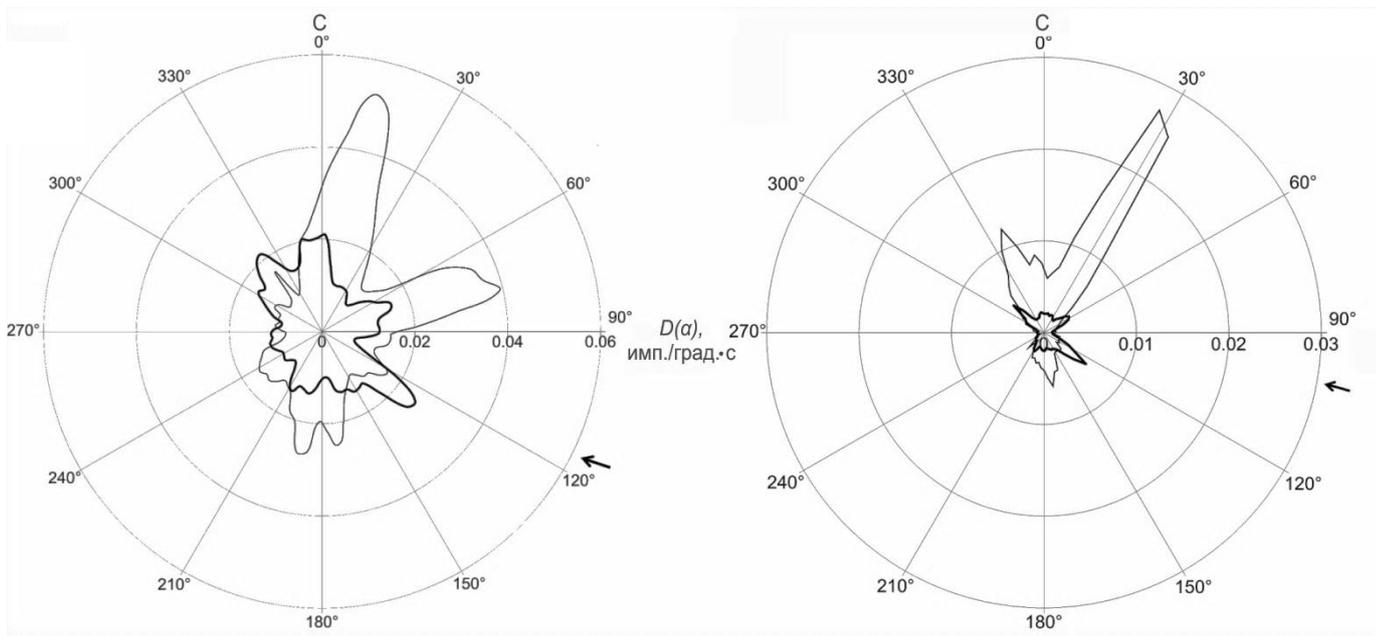


Рисунок 3.10 – Диаграммы азимутального распределения геоакустической активности $D(\alpha)$, усредненной в суточном интервале, (штриховая линия) перед землетрясениями 15 декабря 2007 г. (а) и 15 мая 2008 г. (б). Сплошной линией показан фоновый уровень активности в ноябре 2007 г. – феврале 2008 г. (а), в мае – июне 2008 г. (б), стрелками показаны азимуты землетрясений [Марапулец, Шевцов, 2012]

Появление ярко выраженных максимумов в азимутальном распределении эмиссии перед землетрясениями свидетельствует об образовании большого количества одинаково ориентированных сдвиговых источников акустического излучения, обусловленных действием деформационного процесса, охватывающего весь контролируемый объем пород [Марапулец, Щербина, 2013]. С учетом того, что ориентация указанных источников определяется направлением максимальных касательных напряжений, ориентированных преимущественно под углом 45° к оси наибольшего сжатия пород и, что максимумы продольных акустических колебаний приходятся на направления, перпендикулярные этой оси при сжатии и совпадающие

с ней при растяжении, по максимумам акустического излучения можно производить оценку ориентации оси наибольшего сжатия, как направления им перпендикулярного.

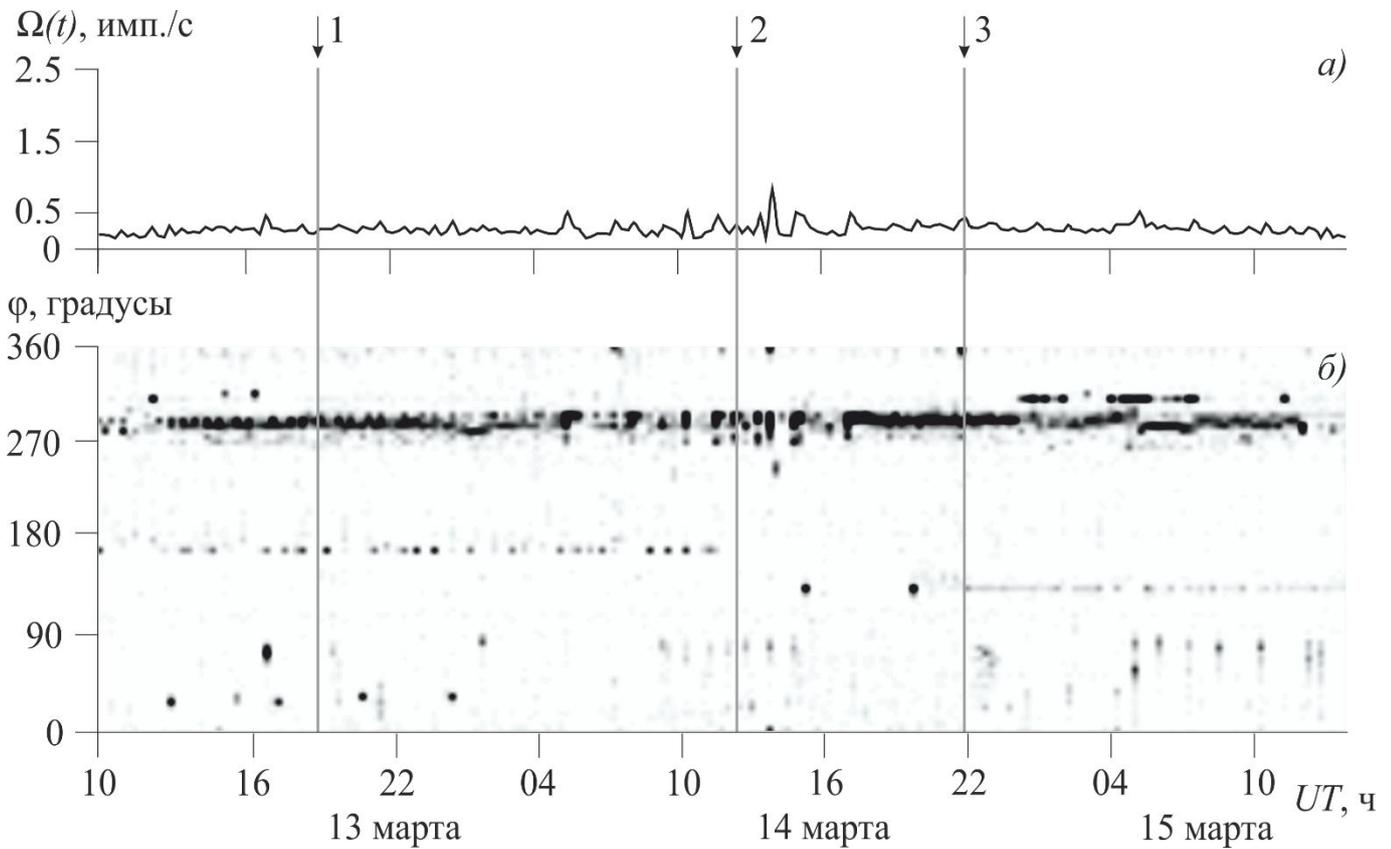


Рисунок 3.11 – Акустическая активность $\Omega(t)$ (а) и ее азимутальное распределение $D(\alpha, t)$ (б), зарегистрированные в окрестности землетрясений 13 марта 2016 г. в 18:42 UT (1), 14 марта 2016 г. в 12:36 UT (2) и в 21:50 UT (3)

3.3 Анализ изменения направленности высокочастотной геоакустической эмиссии перед землетрясениями и при последующей релаксации напряжений

Для исследования изменения направленности геоакустического излучения во время землетрясений были отобраны 339 сейсмических событий, произошедших в период с августа 2008 г. по январь 2016 г. Их характеристики представлены в Приложении А в таблице А.1. Критерии для отбора землетрясений (таблица 3.2) приняты в соответствии с результатами исследований [Добровольский, 1984; Купцов,

2005]. Землетрясения, произошедшие с 10 февраля по 09 июля 2013 г., не рассматривались при анализе из-за отсутствия геоакустических данных в указанный период.

Таблица 3.2 – Критерии для отбора землетрясений

Энергетический класс K_s	Эпицентральное расстояние R , км
$9.0 < K_s \leq 10.0$	$R \leq 120$
$10.0 < K_s \leq 11.0$	$R \leq 190$
$11.0 < K_s \leq 12.0$	$R \leq 240$
$K_s > 12.0$	$R \leq 350$

Затем в условиях спокойной погоды (слабо меняющееся давление, отсутствие осадков и ветра более 6 м/с) в интервале ± 5 суток в окрестности землетрясения рассматривались величина акустической активности и ее азимутальное распределение. Считалось, что в направленности геоакустического излучения наблюдаются аномалии, связанные с сейсмическим событием, когда в вышеуказанном временном интервале частота следования геоакустических импульсов и ее распределение по какому-либо одному или нескольким отдельным направлениям превышают значения соответствующих фоновых уровней в 2.5 и более раз. Фоновые уровни принимались по результатам предварительного анализа ряда многолетних наблюдений акустической активности.

В результате установлено наличие аномалий направленности геоакустического излучения в окрестностях 251 землетрясения из 339, что составляет 74% (таблица 3.3).

Отдельные аномалии могли быть связаны с процессами подготовки сразу нескольких сейсмических событий. В качестве примеров рассмотрим несколько таких случаев.

Таблица 3.3 – Землетрясения Камчатки с откликом ГАЭ и без него

Энергетический класс K_s	Эпицентральное расстояние R , км	Всего	Имели отклик	Процентное соотношение, %
$9.0 < K_s \leq 10.0$	$R \leq 120$	89	44	49
$10.0 < K_s \leq 11.0$	$R \leq 190$	112	92	82
$11.0 < K_s \leq 12.0$	$R \leq 240$	74	64	86
$K_s > 12.0$	$R \leq 350$	64	51	79
	ИТОГО:	339	251	74

На рисунке 3.12 представлена акустическая активность $\Omega(t)$ и ее азимутальное распределение $D(\alpha, t)$, наблюдавшиеся с 21 по 24 сентября 2014 г. Здесь резкому увеличению частоты следования геоакустических импульсов (с превышением фонового уровня, равного 1 имп./с, в 3 раза) соответствовала активизация направлений в достаточно широком диапазоне азимутов от 0° до 50° . Аномалия направленности наблюдалась немногим более двух суток. В это время было зарегистрировано два достаточно сильных землетрясения: 22 сентября в 16:56 UT (координаты эпицентра: 51.62° N, 158.03° E) с энергетическим классом $K_s = 11.1$ на эпицентральном расстоянии $R = 153$ км по азимуту $\varphi = 185^\circ$ и 24 сентября 2014 г. в 03:59 UT (координаты эпицентра: 52.68° N, 159.30° E) с $K_s = 12.1$ на $R = 80$ км по азимуту $\varphi = 116^\circ$. Аномальные изменения акустической активности могли быть обусловлены влиянием процессов подготовки одного из двух землетрясений, а возможно и сразу обоих, на поле локальных напряжений в пункте наблюдений.

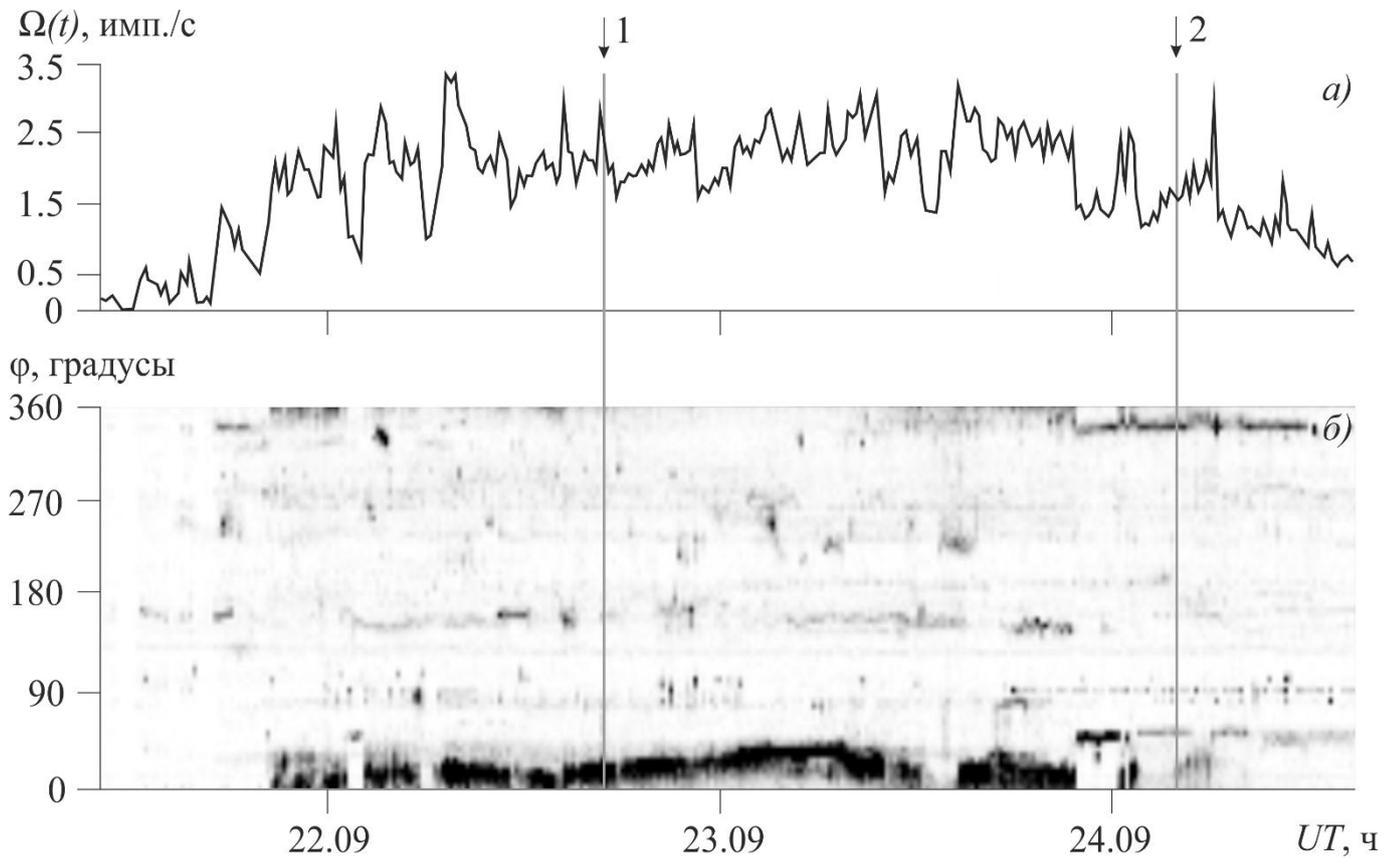


Рисунок 3.12 – Акустическая активность $\Omega(t)$ (а) и ее азимутальное распределение $D(\alpha, t)$ (б), зарегистрированные в окрестности землетрясений 22 (1) и 24 (2) сентября 2014 г.

Рисунок 3.13 иллюстрирует изменения акустической активности и ее азимутального распределения в окрестности трех землетрясений: 16 сентября в 23:59 UT (координаты эпицентра: 53.07° N, 159.57° E, энергетический класс $K_s = 9.3$, эпицентральное расстояние $R = 90$ км, азимут $\varphi = 84^\circ$), 17 сентября 2015 г. в 08:58 UT (53.08° N, 160.16° E, $K_s = 13.3$, $R = 130$ км, $\varphi = 59^\circ$) и в 11:36 UT (52.03° N, 158.95° E, $K_s = 9.1$, $R = 117$ км, $\varphi = 155^\circ$). Во время аномалии акустическая активность превысила в 2.8 раз фоновый уровень, равный 0.8 имп./с. По графику азимутального распределения (рисунок 3.13б) видно, что происходило "переключение" наиболее активно излучающих направлений с 240° на 90° и обратно. Эти блуждания вероятнее всего определены неоднородностями среды в точке наблюдений.

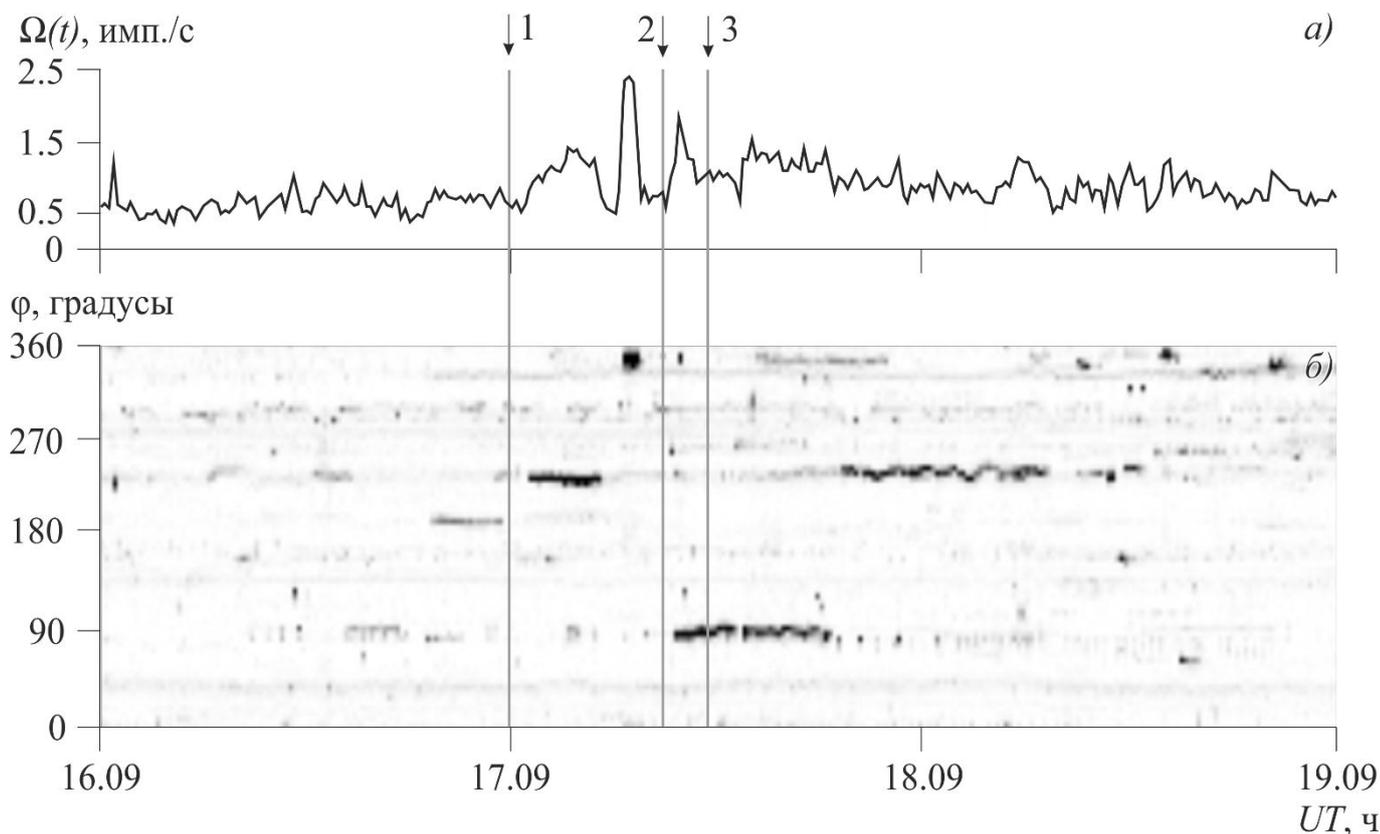


Рисунок 3.13 – Акустическая активность $\Omega(t)$ (а) и ее азимутальное распределение $D(\alpha, t)$ (б), зарегистрированные в окрестности землетрясений 16 сентября в 23:59 UT (1) и 17 сентября 2015 г. в 08:58 UT (2) и в 11:36 UT (3)

Еще один пример аномалии, связанной с несколькими сейсмическими событиями, изображен на рисунке 3.14.

Она зарегистрирована в окрестности землетрясений 12 ноября 2015 г. в 13:54 UT (51.39° N, 158.90° E) по азимуту $\varphi = 165^\circ$ с энергетическим классом $K_s = 12.3$ на эпицентральной расстоянии $R = 183$ км (1 на графике) и 15 ноября 2015 г. в 23:17 UT (52.39° N, 159.36° E) по азимуту $\varphi = 131^\circ$ с $K_s = 11.7$ на $R = 101$ км (2 на графике). Повышению уровня акустической активности соответствует увеличение количества геоакустических импульсов, зарегистрированных по диапазону направлений от 340° до 350° . Аномалия возникла примерно за трое суток перед землетрясением с классом $K_s = 12.3$ и наблюдалась в течение 6.5 суток. Однозначно определить, какое из двух землетрясений в большей степени повлияло на рост активности геоакустической эмиссии, не представляется возможным.

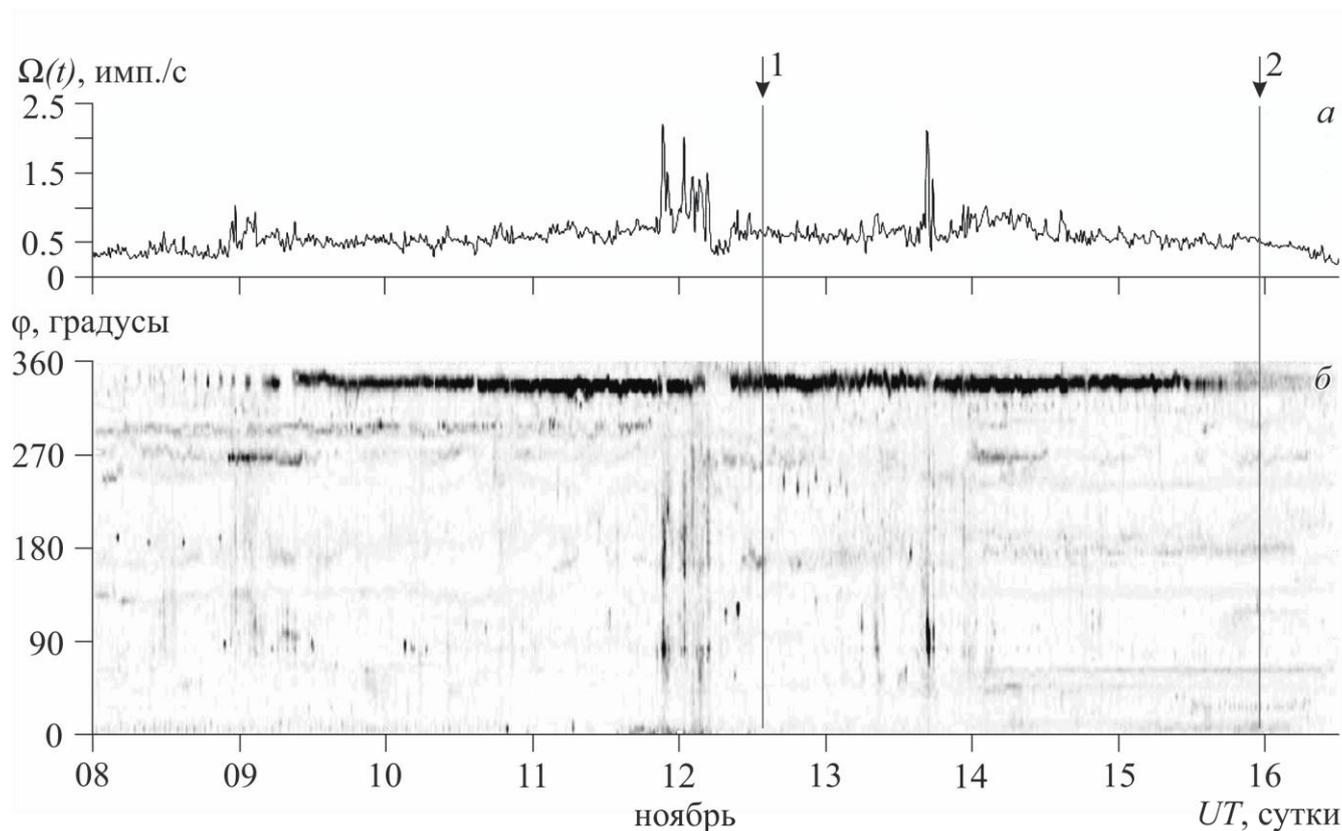


Рисунок 3.14 – Акустическая активность $\Omega(t)$ (а) и ее азимутальное распределение $D(\alpha, t)$ (б) в окрестности землетрясений 12 (1) и 15 (2) ноября 2015 г.

Как показано выше, оценить влияние процессов подготовки конкретных сейсмических событий на ориентацию источников геоакустической эмиссии достаточно сложно, поэтому аномалии, которые могли быть связаны с несколькими землетрясениями, исключались из дальнейшего рассмотрения.

Таким образом, при детальном анализе изменчивости направленности высокочастотного геоакустического излучения учитывались аномалии направленности, наблюдающиеся в окрестности только одного землетрясения. Они были зарегистрированы в 82-х случаях (Приложение А, таблица А.2). Длительность таких аномалий варьировалась в диапазоне от 10 до 50 ч (рисунок 3.15), а повышенная активность регистрировалась в основном с направлений, соответствующих азимутам 50° , 155° , 225° , 320° (рисунок 3.16). Следует отметить, что полученные значения азимутов соответствуют результатам более ранних исследований направленности геоакустического излучения [Марапулец, Щербина, 2013].

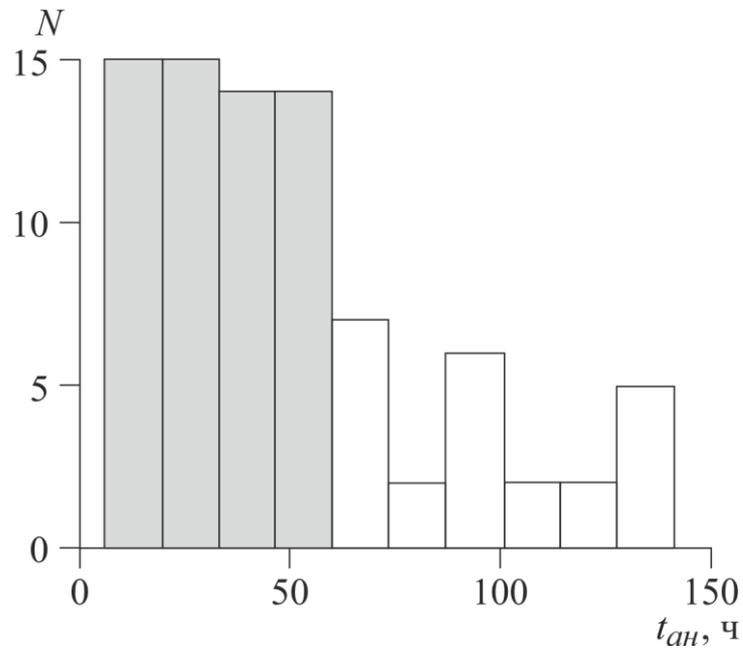


Рисунок 3.15 – Гистограмма длительности аномалий геоакустического излучения. N – количество аномалий

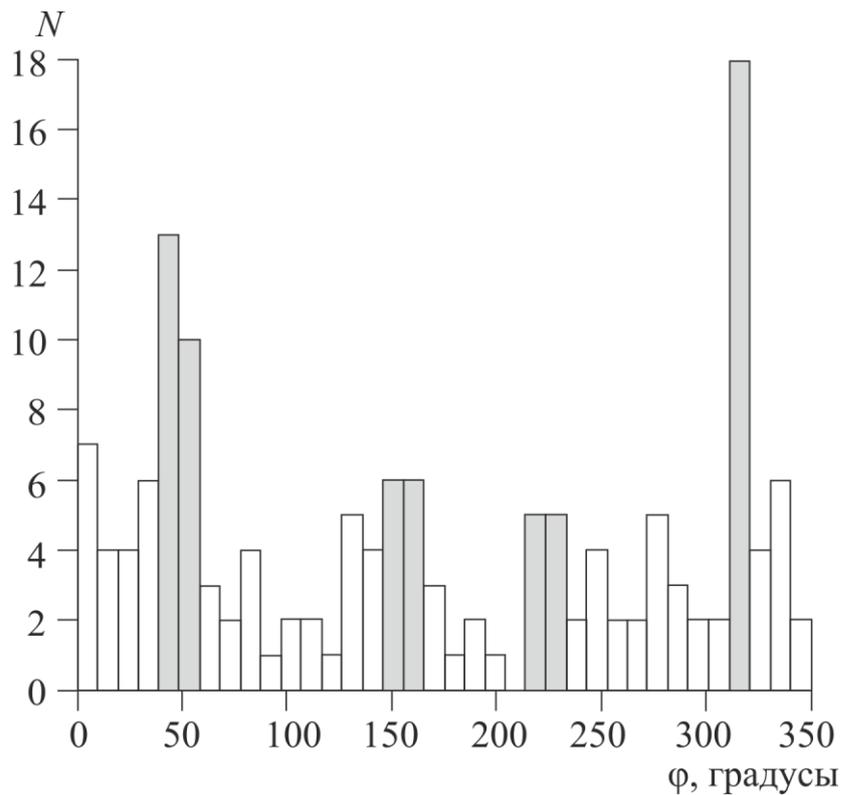


Рисунок 3.16 – Гистограмма направлений ярко выраженных максимумов аномалий. N – количество аномалий

Анализ продолжительности аномалий направленности геоакустического излучения в окрестности сейсмических событий показал, что в основном они

возникали за 10-30 ч перед землетрясением (рисунок 3.17) и в большинстве случаев продолжались в течение 6-20 ч после него (рисунок 3.18).

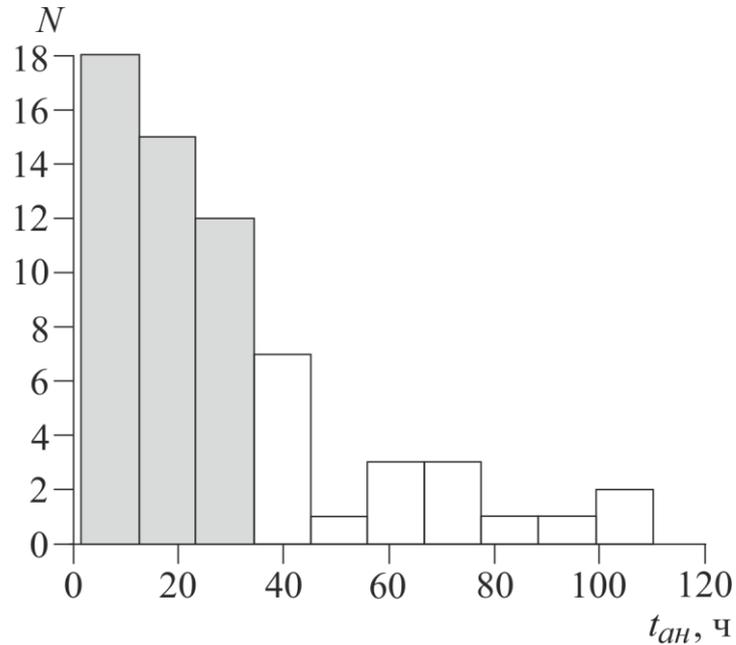


Рисунок 3.17 – Гистограмма длительности предсейсмических аномалий

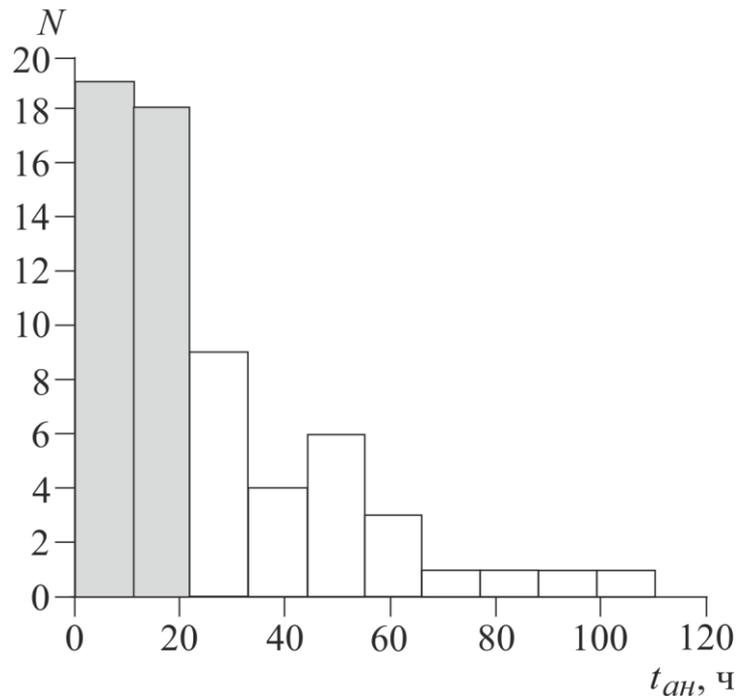


Рисунок 3.18 – Гистограмма длительности постсейсмических аномалий

Связи между длительностью аномалий и классом землетрясений (рисунок 3.19), а также эпицентральной расстоянием (рисунок 3.20) выявлено не

было. Коэффициенты корреляции этих величин составили минус 0.04 и 0.01 при уровнях значимости 0.7 и 0.9 соответственно.

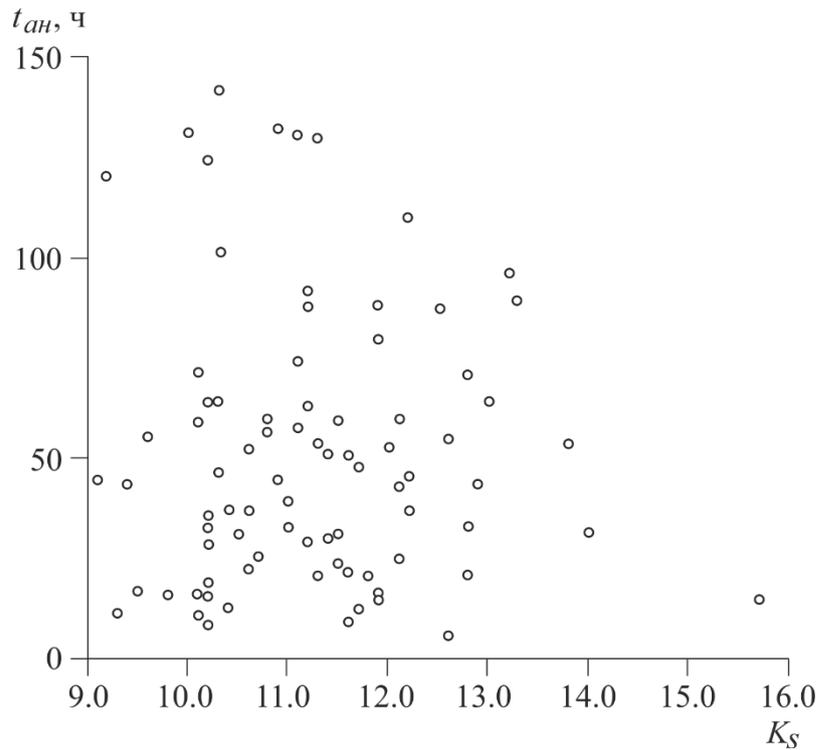


Рисунок 3.19 – Зависимости длительности пред- и постсейсмических аномалий $t_{ан}$ от класса землетрясения K_s

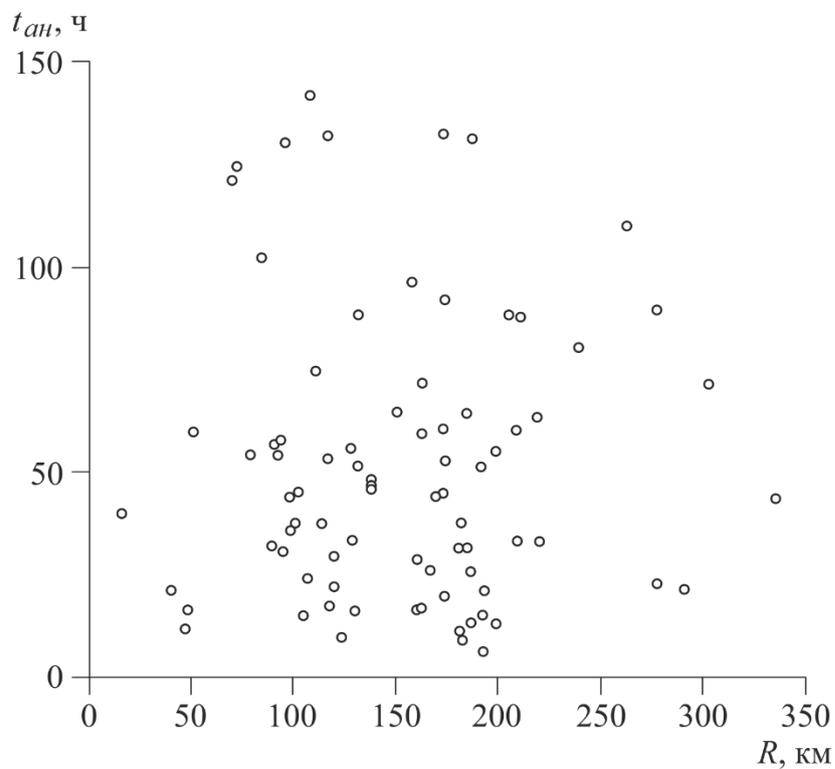


Рисунок 3.20 – Зависимость длительности пред- и постсейсмических аномалий $t_{ан}$ от эпицентрального расстояния R

Рассмотрим несколько случаев изменений направленности геоакустического излучения в окрестности сейсмического события.

На рисунке 3.21 показана аномалия, зарегистрированная за 30 ч перед землетрясением с энергетическим классом $K_s = 10.3$, произошедшим 17 декабря 2012 г. в 03:10 UT (координаты эпицентра: 51.87° N, 159.12° E) по азимуту $\varphi = 154^\circ$ на эпицентральной дистанции $R = 138$ км (1 на графике), и закончившаяся через 17 ч после него (длительность аномалии составила 47 ч). На графике интегральной активности (рисунок 3.21а) наблюдается резкое увеличение частоты следования геоакустических импульсов (с превышением фонового уровня более чем в 4 раза), которому соответствует активизация направлений в диапазоне от 40° до 50° (рисунок 3.21б).

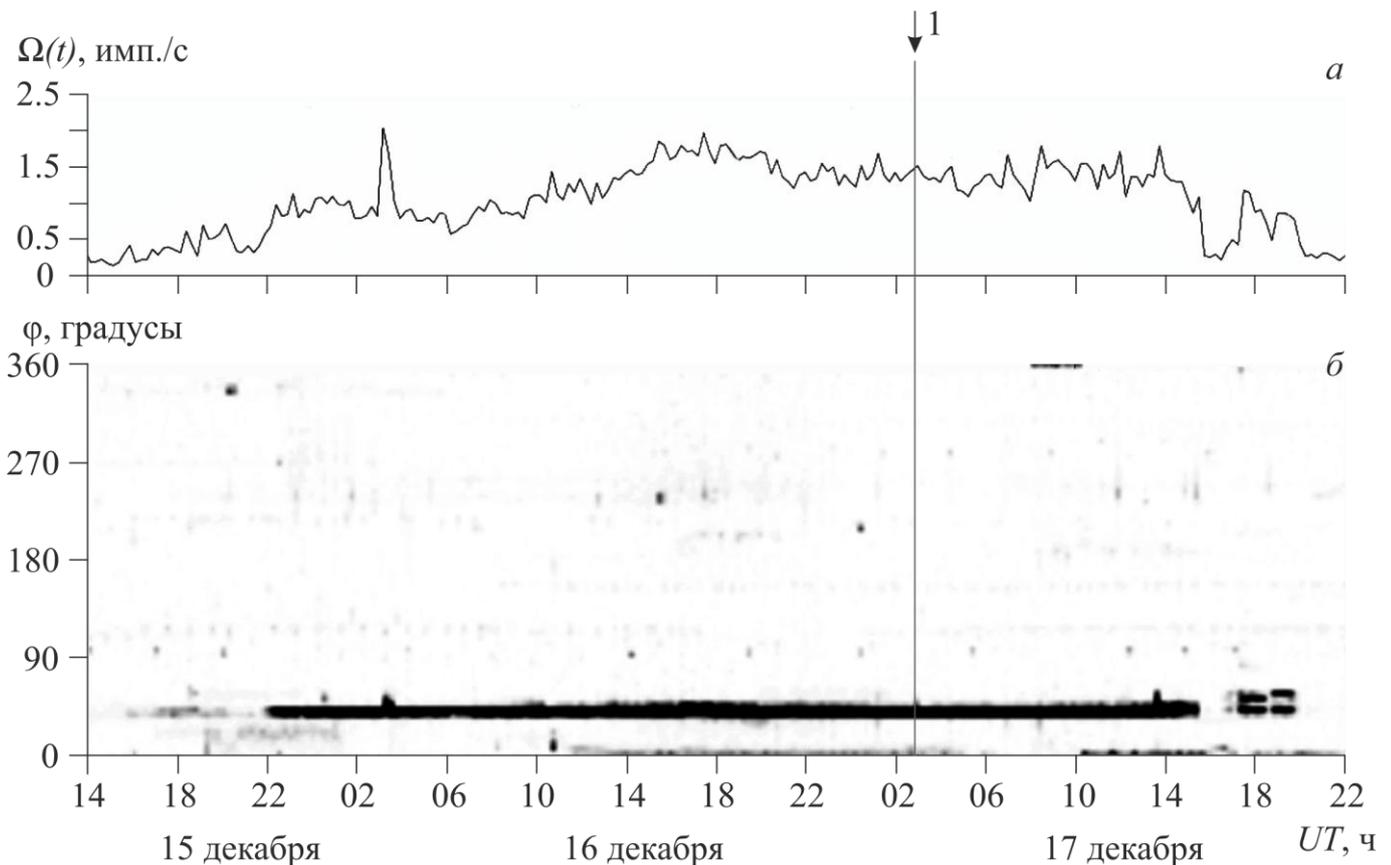


Рисунок 3.21 – Акустическая активность $\Omega(t)$ (а) и ее азимутальное распределение $D(\alpha, t)$ (б) в окрестности землетрясения с энергетическим классом $K_s = 10.3$ (1)

На рисунке 3.22 представлены аномалии направленности геоакустического излучения, связанные с землетрясением с энергетическим классом $K_s = 15.7$, произошедшим 30 января 2016 г. в 03:25 UT (53.85° N, 159.03° E) по азимуту $\varphi = 29^\circ$ на эпицентральной дистанции $R = 110$ км (1 на графике), и его наиболее сильными афтершоками, зарегистрированными 30 января 2016 г. в 03:42 UT (53.75° N, 159.07° E) с $K_s = 11.6$, $R = 101$ км, $\varphi = 33^\circ$ (2 на графике) и в 06:53 UT (53.87° N, 159.21° E) с $K_s = 10.5$, $R = 117$ км, $\varphi = 33^\circ$ (3 на графике). Аномалия по диапазону направлений от 330° до 350° (рисунок 3.22б), при которой наблюдалось превышение фонового уровня акустической активности более чем в 5 раз (рисунок 3.22а), началась за 15 ч до землетрясения с $K_s = 15.7$ и закончилась примерно за 30 минут до него. Практически одновременно с ней по азимуту 280° (рисунок 3.22б) зарегистрировано несколько меньшее повышение активности, которое продолжалось и после землетрясения и вероятнее всего связано с наличием афтершоков.

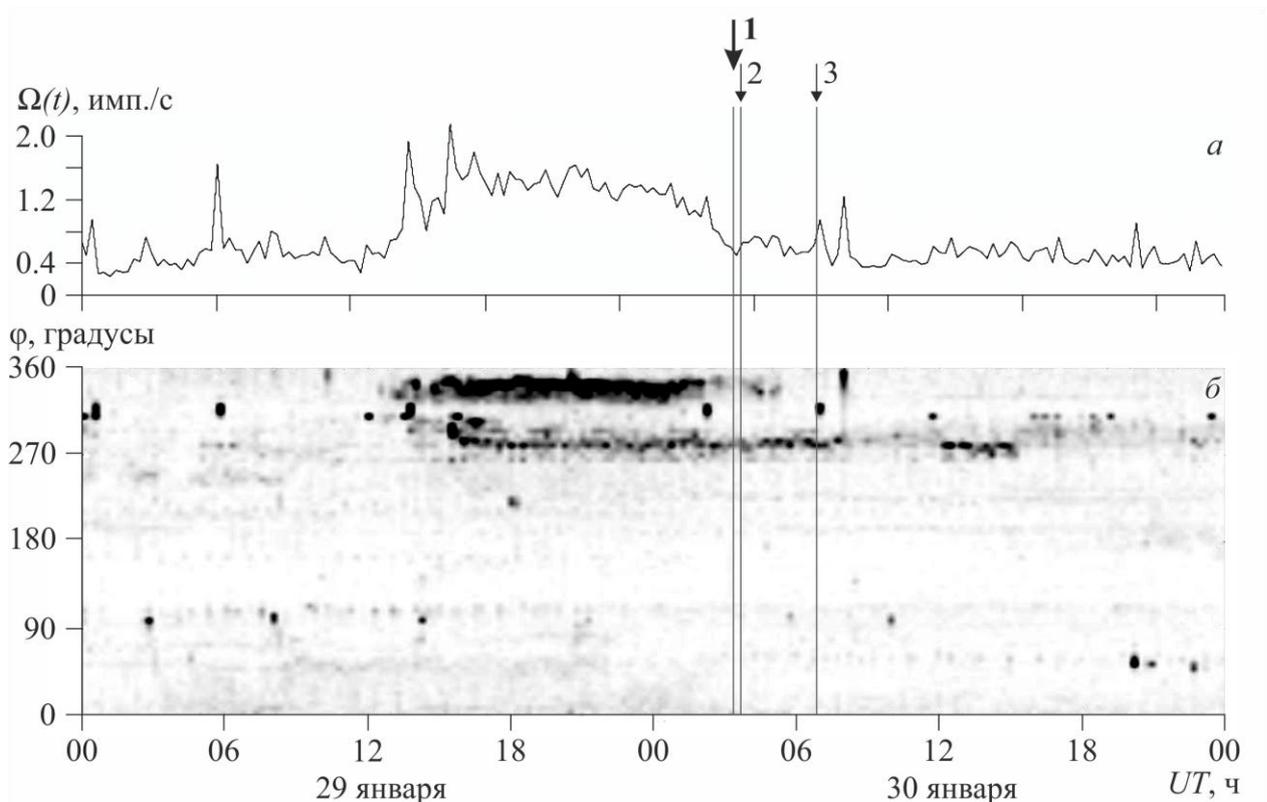


Рисунок 3.22 – Акустическая активность $\Omega(t)$ (а) и ее азимутальное распределение $D(\alpha, t)$ (б) в окрестности землетрясения с $K_s = 15.7$ (1) и его афтершоков (2 и 3).

Рисунок 3.23 иллюстрирует изменение акустической активности, связанной с землетрясением с энергетическим классом $K_s = 9.8$, произошедшим 21 мая 2016 г. в 11:04 UT (53.05° N, 158.95° E) по азимуту $\varphi = 82^\circ$ на эпицентральной дистанции $R = 49$ км. Аномалия наблюдалась в течение 16 ч: она началась за 1.5 ч перед землетрясением и закончилась через 14.5 ч после него. На графике интегральной активности (рисунок 3.23а) наблюдается резкое увеличение частоты следования геоакустических импульсов (с превышением фонового уровня более чем в 5 раз), которому соответствуют активизация направления в диапазоне от 310° до 320° и краткосрочное повышение активности по азимуту 140° (рисунок 3.23б).

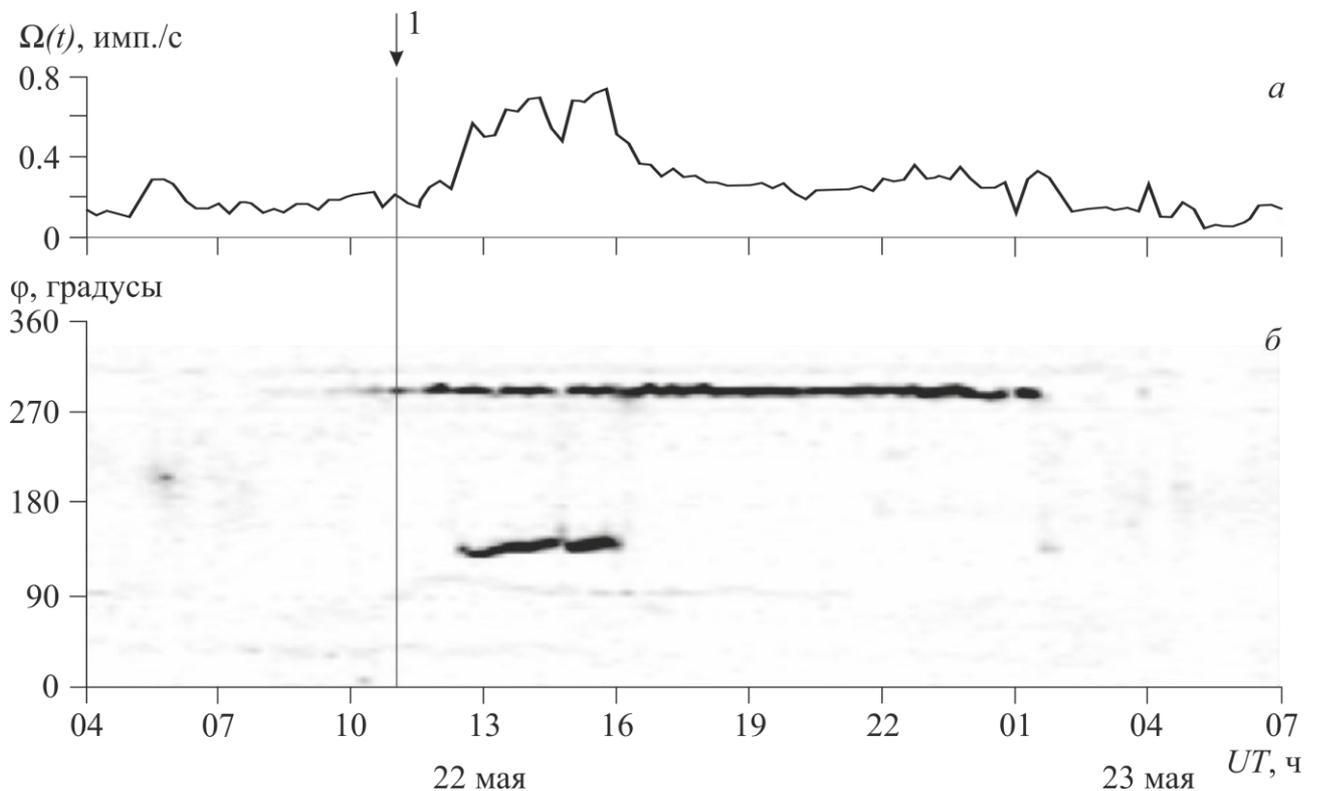


Рисунок 3.23 – Акустическая активность $\Omega(t)$ (а) и ее азимутальное распределение $D(\alpha, t)$ (б) в окрестности землетрясения с $K_s = 9.8$ и $R = 49$ км (1)

Еще один интересный случай представлен на рисунке 3.24. На нем демонстрируется пример регистрации повышенной акустической активности (рисунок 3.24а) с разных направлений в окрестностях трех землетрясений: 1 декабря 2016 г. в 05:16 UT (52.16° N, 158.36° E) с энергетическим классом $K_s = 11.3$

и эпицентральной расстоянием $R=93$ км по азимуту $\varphi=175^\circ$ (1 на графике), 2 декабря 2016 г. в 01:16 UT (51.39° N, 157.95° E) с $K_s=11.9$, $R=179$ км, $\varphi=186^\circ$ (2 на графике) и в 12:26 UT (50.76° N, 158.01° E) с $K_s=11.5$, $R=248$ км, $\varphi=184^\circ$ (3 на графике). Так, по рисунку 3.24б видно, что примерно за 13 ч до землетрясения с $K_s=11.9$ началась аномалия в диапазоне направлений от 270° до 290° , которая наблюдалась в течение 16 ч. Сразу после нее, предвеляя землетрясение с $K_s=11.5$, возникла повышенная активность в диапазоне азимутов от 310° до 330° , которая сохранялась еще около 4 ч после землетрясения. Аномалия по азимуту 75° наблюдалась в течение 54 ч в окрестности всех трех землетрясений.

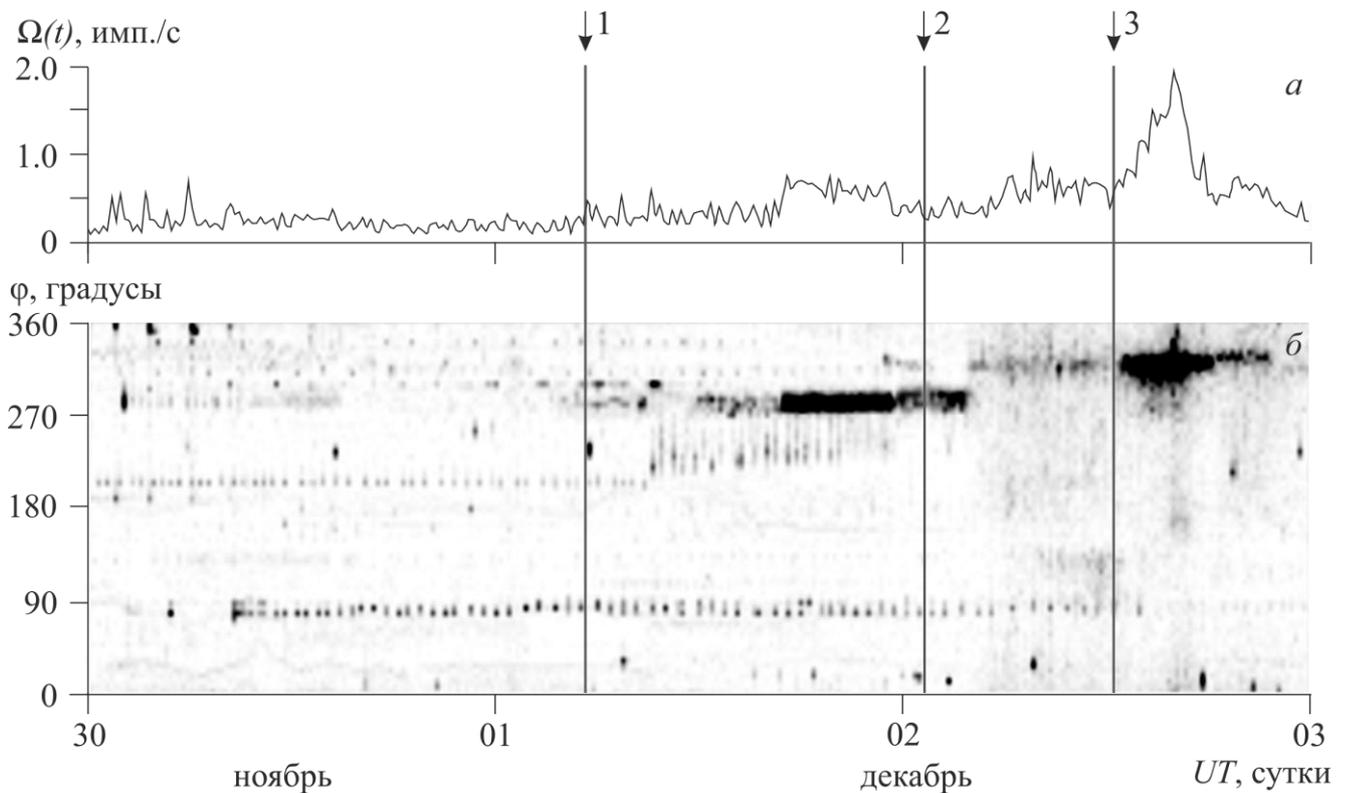


Рисунок 3.24 – Акустическая активность $\Omega(t)$ (а) и ее азимутальное распределение $D(\alpha, t)$ (б), зарегистрированные в окрестности землетрясений с энергетическими классами $K_s=11.3$ (1), $K_s=11.9$ (2) и $K_s=11.5$ (3)

Таким образом, в направленности высокочастотной геоакустической эмиссии наблюдаются аномальные изменения, связанные с землетрясениями, которые выражаются в довольно резком увеличении частоты следования геоакустических

импульсов по отдельным направлениям. Такие изменения наблюдались в окрестностях 74% землетрясений, произошедших за период с августа 2008 г. по декабрь 2016 г. Аномалии возникали за 10–30 ч перед землетрясением и в большинстве случаев продолжались в течение 6–20 ч после него.

Выводы по главе 3

Для исследования направленных свойств геоакустической эмиссии применяется комбинированный приемник, размещенный у дна озера, регистрирующий акустическое давление и три его взаимно ортогональных градиента. Восстановление пространственно-временного распределения вектора колебательной скорости частиц в акустической волне и, соответственно, определение направления ее прихода осуществляется в рамках векторно-фазового подхода применением амплитудного метода к этим четырем сигналам.

Исследования активности геоакустической эмиссии показывают, что ее величина достигает максимального значения в осенние месяцы, а минимального – в весенние. В спокойные дни средняя геоакустическая активность составляет от 0.1 до 0.5 имп./с и имеет достаточно равномерное распределение по направлениям. В периоды активизации деформационных процессов, в частности, обусловленных землетрясениями, наблюдается ее довольно резкое увеличение, и на диаграммах ее азимутального распределения появляются ярко выраженные максимумы по отдельным направлениям (аномалии направленности). Они наблюдаются как при подготовке землетрясений, так и при последующей релаксации остаточных напряжений в пункте наблюдений.

Аномалии направленности высокочастотной геоакустической эмиссии возникают за 10–30 ч перед землетрясением и в большинстве случаев продолжаются в течение 6–20 ч после него. Длительность аномалий варьируется в диапазоне от 10 до 50 ч, а повышенная активность регистрируется в основном с направлений, соответствующих азимутам 50°, 155°, 225°, 320°.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных в работе исследований получены следующие основные результаты:

1. Показано, что при росте акустической активности в 5-суточном интервале перед землетрясениями с энергетическими классами $9.0 < K_s \leq 10.0$, $10.0 < K_s \leq 11.0$, $11.0 < K_s \leq 12.0$ и $K_s > 12.0$ на эпицентральных расстояниях $R \leq 120$ км, $R \leq 190$ км, $R \leq 240$ км и $R \leq 350$ км соответственно появляются ярко выраженные максимумы в азимутальном распределении геоакустического излучения, превышающие фоновые значения в несколько раз, которые продолжают и после землетрясений.

2. Исследована статистика появления пред- и постсейсмических аномальных изменений направленности высокочастотной геоакустической эмиссии. За период с 2008 по 2016 год такие изменения наблюдались в окрестностях более чем 70% землетрясений. Аномалии возникали за 10-30 ч перед землетрясением и в большинстве случаев продолжались в течение 6-20 ч после него. Длительность аномалий варьировалась в диапазоне от 10 до 50 ч, а повышенная активность регистрировалась в основном с направлений, соответствующих азимутам 50° , 155° , 225° , 320° .

3. При исследовании фоновых характеристик высокочастотной геоакустической эмиссии, в частности ее периодических составляющих, установлено наличие суточной вариации с периодом равным 24 ч. Обнаружена статистическая связь между этой вариацией и суточной вариацией температуры. Показано, что наиболее вероятной причиной выявленной связи является влияние суточной разницы температур на приповерхностные осадочные породы, в которых генерируется эмиссия. Влияния других метеорологических величин, а также землетрясений на суточную составляющую не выявлено.

4. Предложена методика автоматического выделения суточного хода геоакустической эмиссии, основанная на сравнении очищенных с помощью вейвлет-разложения сигналов геоакустической эмиссии с эталонными сигналами, которая реализована в виде компьютерной программы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аки, К. Количественная сейсмология. Теория и методы / К. Аки, П. Ричардс. – Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – Т. 1. – 519 с.
2. Аномалия высокочастотных сигналов геоакустической эмиссии как оперативный предвестник землетрясения / В.А. Гордиенко, Т.В. Гордиенко, Н.В. Краснописцев и др. // Акустический журнал. – 2008. – Т. 54, № 1, – С. 97-109.
3. Аносов, Г.И. Глубинное сейсмическое зондирование Камчатки / Г.И. Аносов, С.К. Биккенина, А.А. Попов и др. – М.: Наука, 1978. – 130 с.
4. Беляков, А.С. Методика сейсмоакустических наблюдений / А.С. Беляков, А.В. Николаев // Физика земли. – 1995. – № 8. – С. 89-93.
5. Беляков, А.С. Сейсмоакустические приёмники с магнитоупругим преобразователем / А.С. Беляков, А.В. Николаев // Физика земли. – 1993. – № 7. – С. 74-80.
6. Беляков, А.С. Что происходит в земной коре между закатом и восходом солнца / А.С. Беляков, В.С. Лавров, А.В. Николаев // ДАН. – 2011. – Т. 438, № 2. – С. 249-252.
7. Виброупругость, акустопластика и акустическая эмиссия нагруженных горных пород / Л.М. Богомолов, Б.Ц. Манжиков, В.Н. Сычев, Ю.А. и др. // Геология и геофизика. – 2001. – Т.42, №10. – С. 1678-1689.
8. Виноградов, С.Д. Упругие волны, излучаемые от трещин отрыва и от сдвиговой подвижки по подготовленному разлому / С.Д. Виноградов // Исследование по физике землетрясений. – М.: Наука, 1976а. – С. 67-74.
9. Виноградов, С.Д. Условия на разрыве и спектры излучаемых им волн / С.Д. Виноградов // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1976б. – № 7. – С. 20-26.
10. Войтенко, В.А. Экспериментальные исследования распространения импульсных акустических сигналов в грунте / В.А. Войтенко, Ю.Н. Моргунов // Акустический журнал. – 2011. – Т. 57, № 1. – С. 73–74.
11. Гаврилов, А.В. Физические причины суточных вариаций уровня геоакустической эмиссии / А.В. Гаврилов // ДАН. – 2007. – Т. 414, № 3. – С. 389-392.

12. Гаврилов, В.А. Вариации уровня геоакустической эмиссии в глубокой скважине Г-1 (Камчатка) и их связь с сейсмической активностью / В.А. Гаврилов, Ю.В. Морозова, А.В. Сторчеус // Вулканология и сейсмология. – 2006. – № 1. – С. 52-67.
13. Геоакустическая локация областей подготовки землетрясений / В.А. Гордиенко, Т.В. Гордиенко, А.В. Купцов и др. // ДАН. – 2006. – Т. 407, № 5. – С. 669-672.
14. Геоакустический предвестник Спитакского землетрясения / В.А. Моргунов, М.Н. Любошевский, В.З. Фабрициус, З.Э. Фабрициус // Вулканология и сейсмология. – 1991. – №4. – С. 104-106.
15. Гидроакустическая локация области зарождения океанического землетрясения / С.С. Лаппо, Б.В. Левин, Е.В. Сасорова и др. // ДАН. – 2003. – Т. 388, № 6. – С. 805-808.
16. Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике / В.А. Гордиенко. – М.: Физматлит, 2007. – 480 с.
17. Грешников, В.А. Акустическая эмиссия / В.А. Грешников, Ю.Б. Дробот. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 276 с.
18. Деформационные и акустические предвестники землетрясений / Г.И. Долгих, А.В. Купцов, И.А. Ларионов и др. // ДАН. – 2007. – Т. 413, № 1. – С. 96-100.
19. Добровольский, И. П. Механика подготовки тектонического землетрясения / И.П. Добровольский. – М.: ИФЗ АН СССР, 1984. – 189 с.
20. Добровольский, И.П. Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения / И.П. Добровольский. – М.: Физматлит, 2009. – 240 с.
21. Добровольский, И.П. Об оценке размеров зоны проявления предвестников землетрясений / И.П. Добровольский, С.И. Зубков, В.И. Мячкин // Моделирование предвестников землетрясений. – М.: Наука, 1980. – С. 7-44.
22. Ермолов, И.Н. Неразрушающий контроль. Книга 2. Акустические методы контроля / И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.И. Потапов. – Под. ред. проф. В.В.Сухорукова. – М.: Высшая школа. – 1991. – 283 с.

23. Изучение высокочастотной геоакустической эмиссии приемным модулем на базе векторного приемника / В.А. Гордиенко, Т.В. Гордиенко, Ю.В. Марапулец и др. // Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика. Астрономия. – 2009. – № 4. – С.94-98.

24. К вопросу о связи высокочастотного сейсмического шума с лунно-солнечными приливами / Е.И. Гордеев, В.А. Салтыков, В.И. Сеницын и др. // ДАН. – 1995. – Т. 340, № 3. – С. 386-388.

25. Купцов, А.В. Анализ изменений геоакустической эмиссии в процессе подготовки сильных землетрясений на Камчатке / А.В. Купцов, Ю.В. Марапулец, Б.М. Шевцов // Эл. журнал «Исследовано в России». – 2004. – Т. 7. – С. 2809-2818. – URL: <http://www.sci-journal.ru/articles/2004/262.pdf> (дата обращения: 31.03.2015).

26. Купцов, А.В. Изменение характера геоакустической эмиссии в связи с землетрясением на Камчатке / А.В. Купцов // Физика Земли. – 2005. – № 10. – С. 59-65.

27. Купцов, А.В. Особенности геоакустической эмиссии при подготовке камчатских землетрясений / А.В. Купцов, И.А. Ларионов, Б.М. Шевцов // Вулканология и сейсмология. – 2005. – № 5. – С. 45-58.

28. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика. Теория упругости / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1987. – Т. 7. – 248 с.

29. Ларионов, И.А. Отклик геоакустической эмиссии на процесс подготовки землетрясений в разных пунктах наблюдений / И.А. Ларионов, А.О. Щербина, М.А. Мищенко // Вестник КРАУНЦ. Серия науки о Земле. – 2005. – №2 (6). – С. 108-115.

30. Марапулец, Ю.В. Анализ структуры сигналов акустической эмиссии звукового диапазона методом разреженной аппроксимации / Ю.В. Марапулец, А.Б. Тристанов, Б.М. Шевцов // Акустический журнал. – 2014. – Т. 60, № 4. – С. 398-406.

31. Марапулец, Ю.В. Изменение направленности геоакустического излучения на станции «Микижа» в связи с землетрясениями на Камчатке / Ю.В. Марапулец, А.А. Солодчук, А.О. Щербина // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. – 2016. – № 4 (15). – С. 74-79.

32. Марапулец, Ю.В. Методы исследования пространственной анизотропии геоакустической эмиссии / Ю.В. Марапулец, А.О. Щербина // Эл. журнал «Техническая акустика». – 2008. – № 14. – 17 с. – URL:<http://ejta.org/archive/articles2008/marapuletz1.zip> (дата обращения: 31.03.2015).

33. Марапулец, Ю.В. Особенности азимутального распределения потока геоакустических сигналов в условиях изменчивости деформационного процесса в приповерхностных породах / Ю.В. Марапулец, А.О. Щербина // Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений: сб. докл. VI Международной конференции, 9-13 сентября 2013 г., Паратунка, Камчатский край. – Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2013. – С. 316-319.

34. Марапулец, Ю.В. Результаты исследования суточных вариаций геоакустической эмиссии на озере Микижа в период 2006-2011 гг. / Ю.В. Марапулец, М.А. Мищенко, А.А. Солодчук // Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений: сб. докл. VI Международной конференции, 9-13 сентября 2013 г., Паратунка, Камчатский край. – Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2013. – С. 349-353.

35. Марапулец, Ю.В. Суточный ход температуры как причина возникновения периодической вариации высокочастотной геоакустической эмиссии / Ю.В. Марапулец, А.А. Солодчук // Метеорология и гидрология. – 2016. – № 4. – С. 37-44

36. Марапулец, Ю.В., Шевцов Б.М. Мезомасштабная акустическая эмиссия / Ю.В. Марапулец, Б. М. Шевцов. – Владивосток: Дальнаука, 2012. – 126 с.

37. Методы исследования высокочастотной геоакустической эмиссии: монография / Ю.В. Марапулец, А.О. Щербина, М.А. Мищенко и др. / под общ. ред. Ю.В. Марапулец. – Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатГТУ, 2008. – 105 с.

38. Мищенко, М.А. Статистический анализ возмущений геоакустической эмиссии, предшествующих сильным землетрясениям на Камчатке / М.А. Мищенко // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. – 2011. – № 1 (2). – С. 56-64.

39. Одновременный отклик высокочастотной геоакустической эмиссии и атмосферного электрического поля на деформирование приповерхностных

осадочных пород / Ю.В. Марапулец, О.П. Руленко, И.А. Ларионов, М.А. Мищенко // ДАН. – 2011. – Т. 440, № 3. – С. 403-406.

40. Организация наблюдений сейсмических шумов вблизи сейсмофокальной зоны Курило-Камчатской островной дуги / В.А. Салтыков, В.Н. Чебров, В.И. Сеницын и др. // Вулканология и сейсмология. – 2006. – № 3. – С. 43-53.

41. Отклик акустической эмиссии на сейсмический процесс / А.В. Горбатиков, О.А. Молчанов, М. Хаякава, С. Уеда, К. Хаттори, Т. Нагао, А.В. Николаев // Вулканология и сейсмология. – 2001. – № 4. – С. 66-78.

42. Отклик высокочастотной геоакустической эмиссии на активизацию пластических процессов в сейсмоактивном регионе / Ю.В. Марапулец, И.А. Ларионов, А.О. Щербина и др. // Ученые Записки Физического Факультета МГУ. – 2014. – № 6. – 146311.

43. Отклик геоакустической эмиссии на активизацию деформационных процессов при подготовке землетрясений / Ю.В. Марапулец, Б.М. Шевцов, И.А. Ларионов и др. // Тихоокеанская геология. – 2012. – Т. 31, № 6. – С. 59-67.

44. Пережогин, А.С. Модели напряженно-деформированного состояния горных пород при подготовке землетрясений и их связь с геоакустическими наблюдениями / А.С. Пережогин, Б.М. Шевцов // Вычислительные технологии. – 2009. – Т. 14, № 3. – С. 48-57.

45. Пинегина, Т.К. Результаты георадиолокационного изучения территории полигона ИКИР в районе озера Микижа. / Т.К. Пинегина. – Отчет. – 2006. – 19 с.

46. Предвестники сильных землетрясений на Камчатке по данным мониторинга сейсмических шумов / В.А. Салтыков, Ю.А. Кугаенко, В.И. Сеницын и др. // Вулканология и сейсмология. – 2008. – № 2. – С. 110-124.

47. Рыкунов, Л.Н. Аппаратура и методы исследования слабых сейсмических эффектов / Л.Н. Рыкунов, О.Б. Хаврошин, В.В. Цыплаков. – Москва, 1978. – 48 с.

48. Рыкунов, Л.Н. Временные вариации высокочастотных сейсмических шумов / Л.Н. Рыкунов, О.Б. Хаврошкин, В.В. Цыплаков // Изв. АН СССР. – Физика Земли. – 1979. – № 11. – С. 72-77.

49. Рыкунов, Л.Н. Модуляция высокочастотных микросейсм / Л.Н. Рыкунов, О.Б. Хаврошкин, В.В. Цыплаков // ДАН СССР. – 1978. – Т. 238, № 2. – С. 303-306.
50. Салтыков, В.А. Особенности пространственной связи приливной компоненты сейсмических шумов с областями подготовки сильных землетрясений / В.А. Салтыков, Ю.А. Кугаенко // Физика Земли. – 2007. – № 9. – С. 48-60.
51. Салтыков, В.А. Особенности связи высокочастотного сейсмического шума и лунно-солнечных приливов / В.А. Салтыков // ДАН. – 1995. – Т. 341, № 3. – С. 406-407.
52. Салтыков, В.А. Вариации приливной компоненты высокочастотного сейсмического шума в результате изменений напряженного состояния среды / В.А. Салтыков, В.И. Синицин, В.Н. Чебров // Вулканология и сейсмология. – 1997. – № 4. – С. 73-83.
53. Салтыков, В.А. Приливные эффекты в высокочастотных сейсмических шумах в сейсмоактивном регионе : дис. ... доктора физ.-мат. наук : 25.00.10 / Салтыков Вадим Александрович. – г. Петропавловск-Камчатский, 2016. – 303 с.
54. Сасорова, Е.В. Низкочастотные сейсмические сигналы как региональные признаки подготовки землетрясений / Е.В. Сасорова, Б.В. Левин // Вулканология и сейсмология. – 1999. – № 4-5. – С. 126-133.
55. Сидоренков, Н.С. Атмосферные процессы и вращение Земли / Н.С. Сидоренко. – СПб.: Гидрометиздат, 2002. – 200 с.
56. Соболев, Г. А. Акустическая эмиссия при разрушении материала в условиях фазового перехода / Г.А. Соболев, Х.О. Асатрян, Б.Г. Салов // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. – 1989. – № 1. – С. 38-43.
57. Соболев, Г.А. Физика землетрясений и предвестников / Г.А. Соболев, А.В. Пономарев. – М.: Наука, 2003. – 270 с.
58. Солодчук, А.А. Комплексная диагностика деформаций приповерхностных пород в сейсмоактивном регионе на полуострове Камчатка / А.А. Солодчук // Взаимодействие полей и излучения с веществом: сб. трудов XIV Конференции молодых ученых, 14-18 сентября 2015 г., Иркутск. – Иркутск: ИСЗФ СО РАН, 2015. – С. 259-261.

59. Солодчук, А.А. Методика выявления суточного хода геоакустической эмиссии / А.А. Солодчук // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. – 2012. – № 2 (5). – С. 69-73.
60. Сташкевич, А.П. Акустика моря / А.П. Сташкевич. – Л.: Судостроение, 1966. – 356 с.
61. Уайт, Дж.Х. Возбуждение и распространение сейсмических волн / Дж.Х. Уайт. – Пер. с англ. – М.: Недра, 1986. – 261 с.
62. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / под. ред. И.П. Голяминой. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.
63. Физическая природа разрыва и излучение сейсмических волн / С.Д. Виноградов, К.И. Кузнецова, А.Г. Москвина и др. // Физические процессы в очагах землетрясений. – М.: Наука, 1980. – С. 129-140.
64. Шамина, О.Г. Модельные исследования неоднородных и трещиноватых сред / О.Г. Шамина, В.И. Понятовская. – М.: ИФЗ РАН, 1993. – 179 с.
65. Шевцов, Б. М. Модели напряженно-деформированного состояния горных пород при подготовке землетрясений и их связь с геоакустическими наблюдениями / Б. М. Шевцов, А.С. Пережогин // Вычислительные технологии. – 2009. – Т. 14, № 3. – С. 49-57.
66. Шевцов, Б.М. О направленности приповерхностной высокочастотной геоакустической эмиссии в периоды деформационных возмущений / Б.М. Шевцов, Ю.В. Марापалец, А.О. Щербина // ДАН. – 2010. – Т. 430, № 1. – С. 119-122.
67. Шерифф, Р. Сейсморазведка. В 2-х т. / Р. Шерифф, Л. Гелдарт. – Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – Т. 1. – 448 с.; Т. 2. – 400 с.
68. Щербина, А.О. Изменение направленности высокочастотной геоакустической эмиссии в периоды деформационных возмущений : дис. ... канд. физ.- мат. наук : 01.04.06 / Щербина Альберт Олегович. – Паратунка, 2010. – 97 с.
69. Acoustic emission (AE) as a diagnostic tool in geophysics / G. Paparo, G.P. Gregori, U. Coppa et al. – Annals of geophysics. – 2002. – Vol. 45, No 2. – P. 401-416.

70. «Storms of crustal stress» and AE earthquake precursors / G.P. Gregori, M. Poscolieri, G. Paparo et al. // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. – 2010. – No. 10. – P. 319-337.

71. Marapulets, Yu.V. Changes of geoacoustic emission directivity at «Mikizha» site associated with earthquakes in Kamchatka / Yu.V. Marapulets, A.A. Solodchuk, A.O. Shcherbina // *E3S Web Conf.* – 2016. – Vol. 11. – P. 00014. – URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2016/06/e3sconf_ikir2016_00014/e3sconf_ikir2016_00014.html (accessed: 10.06.2017).

72. Ohtsu, M. Source mechanisms of AE / M. Ohtsu // *Acoustic Emission Testing* / Eds. C.U.Grosse, M.Ohtsu. – Springer, 2008. – P. 149-174.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

Характеристики землетрясений и аномалий направленности

Таблица А.1 – Данные по землетрясениям и наличию пред- и постсейсмических аномалий направленности

Дата	Время	Координаты, градусы		Глубина, км	Энергетический класс	Эпицентральное расстояние, км	Азимут, градусы	Аномалия направленности эмиссии вблизи землетрясения	
		Широта	Долгота					перед	после
03.11.2008	21:40:03	51.6	159.73	10.18	12.1	187	146	да	нет
19.11.2008	08:25:02	53.04	160.02	39.68	11.6	120	87	да	да
24.11.2008	18:44:18	52.87	159.96	49.44	12.0	117	97	да	да
03.12.2008	11:37:05	52.84	159.95	42.47	12.2	114	98	да	да
13.12.2008	01:25:43	52.18	158.94	75.25	10.2	100	152	да	нет
04.07.2009	04:35:40	54.45	160.49	80.49	10.2	220	184	да	да
11.07.2009	00:31:53	53.33	160.53	42.74	10.2	157	76	да	нет
15.07.2009	07:24:24	53.13	159.19	104.23	8.2	68	110	да	нет
22.07.2009	21:06:05	51.36	159.67	27.53	11.2	205	150	да	да
30.07.2009	15:59:59	53.43	159.59	130.09	9.6	100	62	да	нет
17.08.2009	10:53:12	53.94	160.26	93.84	10.8	171	52	да	нет
17.08.2009	23:02:26	53.73	160.90	27.27	10.9	195	65	нет	нет

Продолжение таблицы А.1

Дата	Время	Координаты, градусы		Глубина, км	Энергетический класс	Эпицентральное расстояние, км	Азимут, градусы	Аномалия направленности эмиссии вблизи землетрясения	
		Широта	Долгота					перед	после
01.09.2009	02:22:10	53.25	158.31	214.42	8.2	30	10	нет	нет
04.09.2009	13:11:16	52.93	160.00	44.10	9.2	119	93	да	да
06.09.2009	03:13:46	53.46	160.10	64.95	10.0	135	67	да	нет
20.09.2009	13:01:20	52.35	159.68	22.44	9.5	121	126	да	да
24.09.2009	04:50:46	52.56	158.83	91.73	8.5	63	140	да	да
08.10.2009	05:25:11	52.82	160.29	10.30	11.9	139	98	да	да
17.10.2009	06:25:33	53.09	158.34	17.50	6.4	13	33	да	нет
18.10.2009	20:47:22	52.52	160.05	73.43	11.7	133	113	да	да
21.10.2009	22:27:00	52.54	159.74	20.99	10.8	113	116	да	да
28.10.2009	08:36:25	53.44	160.91	5.01	11.5	185	74	да	да
28.11.2009	17:49:11	52.74	160.10	41.45	12.0	128	102	да	да
06.12.2009	22:31:40	52.66	159.93	22.63	11.2	120	108	да	да
30.01.2010	07:24:00	53.67	161.10	42.45	11.2	205	68	да	нет

Продолжение таблицы А.1

Дата	Время	Координаты, градусы		Глубина, км	Энергетический класс	Эпицентральное расстояние, км	Азимут, градусы	Аномалия направленности эмиссии вблизи землетрясения	
		Широта	Долгота					перед	после
08.02.2010	10:25:57	52.15	158.87	81.34	10.2	103	155	да	нет
14.02.2010	13:47:22	52.57	159.11	68.75	9.4	75	128	да	нет
16.02.2010	15:17:40	53.73	160.73	63.03	10.6	185	63	да	да
22.02.2010	22:11:01	53.10	158.18	184.00	9.8	13	345	да	нет
27.02.2010	01:17:00	52.41	159.18	61.07	10.8	91	135	да	да
13.03.2010	21:42:00	52.68	160.60	54.66	12.1	163	102	да	да
26.03.2010	00:19:54	54.91	160.95	110.91	10.6	277	39	да	да
25.05.2010	20:49:51	52.68	160.85	20.92	10.5	179	101	да	да
02.06.2010	13:16:28	53.28	160.10	69.93	9.6	129	75	да	да
03.07.2010	18:22:06	53.22	160.46	53.00	10.3	151	80	да	да
11.07.2010	18:09:34	52.76	159.80	53.42	10.3	108	104	да	да
29.07.2010	01:39:36	52.30	160.37	44.29	10.1	163	118	да	да
30.07.2010	03:56:10	52.22	160.45	38.32	14.1	172	120	да	нет
02.08.2010	09:36:00	53.29	160.68	59.79	11.0	16	78	да	да

Продолжение таблицы А.1

Дата	Время	Координаты, градусы		Глубина, км	Энергетический класс	Эпикентральное расстояние, км	Азимут, градусы	Аномалия направленности эмиссии вблизи землетрясения	
		Широта	Долгота					перед	после
15.08.2010	02:10:35	53.24	160.74	56.12	12.9	170	81	да	да
21.08.2010	00:54:15	53.60	162.94	82.60	12.6	320	78	да	да
23.09.2010	12:08:30	53.63	158.95	169.62	10.7	86	34	да	да
25.09.2010	23:53:07	53.30	159.66	81.68	10.6	101	70	нет	нет
07.10.2010	07:25:43	53.26	160.68	48.38	11.4	166	80	да	да
09.10.2010	13:54:27	52.92	158.73	126.00	9.4	34	103	да	да
12.11.2010	06:31:10	54.48	161.64	71.12	12.4	278	53	нет	нет
27.11.2010	19:29:36	55.14	160.35	7.52	11.9	276	29	нет	да
03.02.2011	01:46:35	53.42	159.05	146.60	10.2	72	49	да	да
20.02.2011	21:43:23	55.73	162.46	48.82	14.1	409	41	да	да
27.03.2011	12:15:09	53.67	160.89	53.89	11.6	192	67	да	да
13.05.2011	13:21:25	53.72	160.78	55.54	11.1	187	64	да	да
14.06.2011	23:01:31	55.26	162.51	90.50	12.3	375	47	да	нет
17.06.2011	10:39:32	48.37	156.54	95.62	13.5	527	194	да	да

Продолжение таблицы А.1

Дата	Время	Координаты, градусы		Глубина, км	Энергетический класс	Эпикентральное расстояние, км	Азимут, градусы	Аномалия направленности эмиссии вблизи землетрясения	
		Широта	Долгота					перед	после
18.06.2011	08:37:00	52.75	161.52	40.17	10.3	222	97	нет	нет
29.06.2011	12:08:02	52.48	159.47	58.70	9.3	101	124	да	нет
30.06.2011	20:59:43	53.25	160.70	48.09	10.7	167	80	да	да
16.07.2011	19:33:13	53.35	157.85	216.00	9.3	47	328	да	нет
22.09.2011	22:43:06	52.55	159.58	35.52	11.3	105	120	да	да
10.10.2011	01:14:56	51.98	159.72	71.48	13.0	151	138	да	да
09.11.2011	09:05:01	52.73	158.91	93.95	10.8	54	122	нет	нет
09.11.2011	22:00:58	52.24	160.24	50.35	13.2	159	121	да	да
15.12.2011	13:18:30	52.51	159.89	54.18	11.6	124	115	да	нет
01.01.2012	06:11:39	50.90	159.11	54.62	11.9	240	165	да	да
14.01.2012	06:11:39	52.54	160.11	39.68	11.9	136	111	да	да
27.01.2012	08:57:27	52.03	159.39	40.16	11.9	132	143	да	да
26.05.2012	09:45:06	52.46	159.66	40.83	10.8	113	121	да	да
26.05.2012	09:43:37	52.47	159.68	43.61	9.7	113	120	да	нет

Продолжение таблицы А.1

Дата	Время	Координаты, градусы		Глубина, км	Энергетический класс	Эпикентральное расстояние, км	Азимут, градусы	Аномалия направленности эмиссии вблизи землетрясения	
		Широта	Долгота					перед	после
26.05.2012	09:45:06	52.46	159.66	40.83	10.8	113	121	нет	да
30.05.2012	20:34:14	53.04	159.43	84.02	9.8	80	86	да	нет
30.05.2012	21:22:28	54.42	161.96	46.16	12.8	291	57	да	да
09.06.2012	12:02:44	51.38	159.89	43.05	12.5	211	147	да	да
13.06.2012	10:31:46	53.58	159.27	140.14	11.6	95	46	да	да
14.06.2012	09:25:11	52.60	159.73	42.66	9.1	110	113	да	да
14.06.2012	18:40:39	51.96	159.09	45.18	10.7	128	158	да	да
17.06.2012	05:18:30	52.68	160.72	19.83	10.5	170	102	да	да
18.06.2012	02:22:58	52.68	160.77	15.77	10.3	174	101	да	да
18.06.2012	02:27:07	52.63	160.85	16.18	10.4	180	103	да	да
18.06.2012	04:51:35	52.58	160.93	15.93	10.2	187	104	да	да
18.06.12	05:20:31	52.63	160.86	16.68	10.9	181	103	да	да
18.06.12	03:58:03	52.66	160.83	16.25	11.3	178	102	да	да
18.06.12	04:11:43	52.71	160.78	8.55	11.1	174	100	да	да

Продолжение таблицы А.1

Дата	Время	Координаты, градусы		Глубина, км	Энергетический класс	Эпикентральное расстояние, км	Азимут, градусы	Аномалия направленности эмиссии вблизи землетрясения	
		Широта	Долгота					перед	после
18.06.2012	04:57:41	52.74	160.74	16.01	11.2	170	99	да	да
25.06.2012	21:16:02	50.67	157.42	55.89	12.2	263	192	да	да
06.07.2012	14:41:05	52.46	159.52	35.63	9.7	105	124	да	нет
07.07.2012	20:54:45	53.30	160.65	48.22	10.3	165	78	да	да
22.07.2012	04:23:23	53.65	160.72	93.80	10.3	181	66	нет	нет
28.07.2012	07:08:35	52.55	159.78	46.39	9.5	115	115	нет	нет
29.07.2012	02:31:45	52.84	160.23	49.77	11.3	135	97	нет	нет
01.08.2012	13:23:56	53.19	160.58	48.46	10.1	158	82	да	нет
03.08.2012	10:45:41	51.93	158.96	50.55	12.0	128	157	да	да
05.08.2012	22:30:59	52.39	159.50	33.86	9.5	108	128	да	да
28.08.2012	11:24:00	53.24	160.73	48.09	11.2	169	81	нет	нет
06.09.2012	22:10:14	52.98	159.61	94.00	9.8	92	91	да	да
08.09.2012	05:31:56	52.45	158.88	79.77	10.2	74	144	да	да
10.09.2012	21:59:59	50.98	158.08	47.20	11.4	223	183	да	да

Продолжение таблицы А.1

Дата	Время	Координаты, градусы		Глубина, км	Энергетический класс	Эпицентральное расстояние, км	Азимут, градусы	Аномалия направленности эмиссии вблизи землетрясения	
		Широта	Долгота					перед	после
13.09.2012	23:08:30	53.14	157.10	266.43	9.3	77	282	нет	нет
13.09.2012	16:16:21	51.95	158.81	54.19	10.3	122	161	нет	нет
24.09.2012	14:39:53	52.83	159.61	64.50	11.1	94	101	да	нет
15.10.2012	09:05:48	51.63	159.87	48.33	10.4	188	143	да	да
15.10.2012	22:58:50	51.62	159.80	55.70	10.2	186	145	да	да
15.10.2012	01:18:59	51.53	160.06	45.46	13.5	204	142	да	да
15.10.2012	22:44:58	51.63	159.95	46.28	12.6	191	142	да	да
28.10.2012	19:09:27	52.81	157.05	240.00	11.6	81	256	да	да
31.10.2012	10:31:24	52.29	158.68	99.50	9.3	83	159	да	да
20.11.2012	10:20:15	53.36	159.53	88.64	9.3	96	65	нет	нет
24.11.2012	11:52:23	51.43	159.47	61.38	11.9	193	154	да	да
04.12.2012	20:17:39	53.78	160.51	109.99	10.6	175	60	да	да
17.12.2012	03:10:06	51.87	159.12	63.58	10.3	138	154	да	да
21.12.2012	04:49:01	51.90	158.77	109.14	12.2	126	163	да	да

Продолжение таблицы А.1

Дата	Время	Координаты, градусы		Глубина, км	Энергетический класс	Эпикентральное расстояние, км	Азимут, градусы	Аномалия направленности эмиссии вблизи землетрясения	
		Широта	Долгота					перед	после
23.12.2012	14:17:36	52.51	159.42	41.23	10.9	96	124	да	да
24.12.2012	07:54:08	54.74	162.41	47.01	13.2	335	54	да	да
05.01.2013	10:21:04	53.44	157.48	290.91	9.2	71	315	да	да
19.01.2013	16:48:09	52.4	159.07	55.65	11.3	86	139	да	да
22.01.2013	00:42:01	52.63	159.72	40.93	9.4	108	112	да	да
26.01.2013	18:20:53	52.26	159.79	44.28	11.0	133	127	да	да
26.01.2013	18:37:28	52.79	158.38	132.58	10.2	24	156	да	да
31.01.2013	16:42:27	52.94	156.70	270.00	9.1	102	267	да	да
10.07.2013	23:33:46	50.13	158.83	83.92	13.2	320	172	да	нет
12.07.2013	07:39:46	52.12	160.75	43.45	11.2	196	119	нет	нет
15.07.2013	14:43:03	51.62	157.79	112.00	13.0	155	191	да	нет
17.07.2013	01:40:53	52.92	160.03	54.53	10.7	121	94	нет	нет
23.07.2013	09:24:23	52.56	156.66	282.00	9.4	116	248	нет	нет
26.07.2013	08:31:31	51.87	160.72	43.03	11.7	209	126	нет	нет

Продолжение таблицы А.1

Дата	Время	Координаты, градусы		Глубина, км	Энергетический класс	Эпицентральное расстояние, км	Азимут, градусы	Аномалия направленности эмиссии вблизи землетрясения	
		Широта	Долгота					перед	после
27.07.2013	09:42:49	52.01	160.13	46.06	11.0	168	130	нет	нет
28.07.2013	07:21:00	52.00	160.18	41.24	12.5	172	130	нет	да
30.07.2013	01:23:41	51.95	160.22	44.50	10.9	177	130	нет	да
06.08.2013	07:11:06	52.62	160.84	20.48	10.6	180	103	нет	нет
07.08.2013	23:45:13	52.74	160.66	40.55	10.3	165	100	да	да
22.08.2013	13:38:54	51.95	160.24	50.11	10.3	178	130	нет	нет
31.08.2013	23:55:26	53.73	161.11	40.72	11.1	208	67	нет	нет
02.09.2013	08:19:01	52.45	160.08	45.44	12.2	138	116	да	да
20.09.2013	01:02:01	51.66	153.78	471.10	12.1	336	244	да	да
21.09.2013	06:58:08	51.39	158.52	46.25	12.7	179	174	нет	нет
01.10.2013	03:38:20	52.99	153.25	604.60	15.2	333	270	нет	нет
04.10.2013	01:38:12	50.35	157.78	51.08	12.4	295	186	нет	да
04.10.2013	07:50:39	50.27	157.86	47.93	12.5	303	185	да	да
05.10.2013	02:47:35	53.28	157.57	272.67	9.1	54	306	нет	нет

Продолжение таблицы А.1

Дата	Время	Координаты, градусы		Глубина, км	Энергетический класс	Эпикентральное расстояние, км	Азимут, градусы	Аномалия направленности эмиссии вблизи землетрясения	
		Широта	Долгота					перед	после
10.10.2013	20:14:52	52.51	160.79	50.33	10.8	180	107	да	нет
10.10.2013	22:17:56	52.58	160.67	22.99	10.6	170	105	да	нет
10.10.2013	23:47:22	52.45	160.87	49.34	11.0	187	109	да	нет
11.10.2013	19:34:31	52.50	160.79	60.58	11.7	180	107	нет	нет
13.10.2013	07:22:30	52.21	160.71	57.34	11.0	188	117	нет	нет
19.10.2013	08:08:05	53.33	159.69	125.43	9.4	104	69	да	нет
19.10.2013	12:15:52	52.32	157.92	128.00	9.1	77	196	да	нет
23.10.2013	04:19:32	53.81	160.53	102.55	11.7	177	59	да	нет
24.10.2013	01:37:33	50.92	157.08	153.43	12.8	243	199	нет	нет
25.10.2013	13:30:31	53.24	160.21	60.12	10.6	135	78	нет	нет
28.10.2013	02:02:21	52.62	160.07	48.16	10.2	130	108	нет	да
09.11.2013	09:29:40	52.34	159.63	85.87	10.0	119	127	нет	нет
12.11.2013	07:03:49	54.63	162.44	71.59	15.0	330	56	да	да
18.11.2013	04:31:18	52.60	160.89	16.14	11.5	184	104	да	да

Продолжение таблицы А.1

Дата	Время	Координаты, градусы		Глубина, км	Энергетический класс	Эпикентральное расстояние, км	Азимут, градусы	Аномалия направленности эмиссии вблизи землетрясения	
		Широта	Долгота					перед	после
18.11.2013	04:56:30	52.59	160.86	16.26	10.3	182	104	да	да
23.11.2013	00:52:54	53.56	160.80	56.46	10.4	182	70	нет	да
26.11.2013	03:05:32	52.64	160.87	41.81	10.5	181	102	да	нет
28.11.2013	07:39:10	51.94	159.06	56.13	11.0	129	154	да	да
30.11.2013	05:43:00	52.58	159.26	67.98	9.2	83	123	нет	нет
13.12.2013	04:21:00	52.25	159.12	99.96	9.3	102	144	нет	нет
15.12.2013	03:07:07	53.65	160.92	53.09	12.6	193	68	да	нет
06.01.2014	16:18:20	53.43	157.41	250.17	9.3	73	312	нет	нет
31.01.2014	16:39:04	54.55	160.02	177.00	12.8	209	34	да	нет
05.02.2014	02:38:53	53.47	160.78	51.79	11.5	52	72	да	да
11.02.2014	12:46:38	52.75	160.78	41.84	10.8	173	99	да	да
14.02.2014	19:33:26	52.26	160.35	59.59	10.5	164	119	да	да
15.02.2014	05:05:29	52.73	159.55	56.06	9.9	93	108	да	да
28.02.2014	04:34:59	52.01	159.87	28.62	10.8	155	134	да	нет

Продолжение таблицы А.1

Дата	Время	Координаты, градусы		Глубина, км	Энергетический класс	Эпикентральное расстояние, км	Азимут, градусы	Аномалия направленности эмиссии вблизи землетрясения	
		Широта	Долгота					перед	после
28.02.2014	12:40:59	52.01	159.88	42.75	10.1	156	134	да	нет
28.02.2014	12:41:37	52.03	159.78	23.45	10.6	149	135	да	нет
28.02.2014	13:26:16	52.05	159.74	51.60	10.4	146	135	да	нет
28.02.2014	09:09:59	52.03	159.76	70.14	11.3	148	136	да	нет
04.03.2014	03:04:14	53.68	158.93	179.69	9.7	90	31	нет	нет
10.03.2014	14:32:49	52.06	157.82	136.00	11.5	107	195	да	да
12.03.2014	18:18:36	51.58	153.77	468.91	12.8	341	243	нет	нет
13.03.2014	22:09:49	53.00	160.27	56.67	11.0	136	90	нет	нет
14.03.2014	08:21:49	52.05	159.8	38.85	10.2	149	134	нет	нет
18.03.2014	07:23:42	52.83	159.81	59.87	10.0	107	100	нет	нет
02.04.2014	12:33:14	53.30	160.58	47.53	10.1	160	78	да	да
07.04.2014	09:34:47	50.27	156.54	83.90	13.2	324	202	да	да
16.04.2014	20:09:28	53.17	160.41	52.06	11.1	147	82	да	да
20.04.2014	13:50:40	53.17	162.99	86.63	13.3	318	86	да	нет

Продолжение таблицы А.1

Дата	Время	Координаты, градусы		Глубина, км	Энергетический класс	Эпицентральное расстояние, км	Азимут, градусы	Аномалия направленности эмиссии вблизи землетрясения	
		Широта	Долгота					перед	после
28.04.2014	04:37:12	53.25	160.68	53.51	11.6	166	80	да	нет
01.05.2014	19:34:17	52.60	159.76	54.74	10.1	111	113	да	да
06.05.2014	23:09:40	52.82	160.30	48.22	11.5	140	98	да	нет
13.05.2014	03:44:47	52.38	159.54	40.24	10.6	111	127	нет	нет
16.05.2014	11:26:27	51.47	157.51	148.50	11.9	176	196	нет	нет
19.05.2014	18:50:50	52.50	159.88	59.51	11.2	123	116	нет	нет
20.05.2014	03:22:55	52.68	160.01	46.02	10.2	124	106	нет	нет
21.05.2014	12:44:22	51.17	158.41	42.21	11.4	202	176	нет	нет
22.05.2014	17:03:55	52.36	159.63	40.85	10.0	117	126	нет	да
30.05.2014	07:50:14	51.10	159.21	74.11	11.1	220	162	да	нет
07.06.2014	13:11:35	50.55	157.33	65.65	13.3	278	193	да	да
15.06.2014	13:56:16	51.85	160.12	54.24	10.7	180	134	да	нет
15.06.2014	14:49:26	52.21	158.86	81.20	11.3	96	154	да	да
30.06.2014	08:10:15	52.42	160.01	70.64	10.3	135	118	да	нет

Продолжение таблицы А.1

Дата	Время	Координаты, градусы		Глубина, км	Энергетический класс	Эпицентральное расстояние, км	Азимут, градусы	Аномалия направленности эмиссии вблизи землетрясения	
		Широта	Долгота					перед	после
07.07.2014	12:23:40	53.78	159.40	129.26	9.7	117	41	нет	нет
14.07.2014	18:52:49	52.50	159.79	51.09	9.5	118	117	да	нет
15.07.2014	05:48:11	52.04	160.73	59.86	11.7	199	122	да	да
02.08.2014	17:30:26	53.27	160.80	39.06	10.9	174	80	да	да
06.08.2014	00:09:36	54.10	160.42	108.04	10.8	190	49	да	нет
06.08.2014	21:27:33	52.52	160.63	17.36	10.1	169	108	да	нет
16.08.2014	23:35:32	51.40	157.57	112.44	11.1	182	195	да	да
17.08.2014	10:07:18	53.12	160.06	60.00	10.2	123	83	да	нет
19.08.2014	15:23:36	52.78	159.63	61.33	9.1	97	104	да	нет
22.08.2014	20:39:15	53.66	159.66	128.51	9.4	120	52	да	нет
21.09.2014	11:15:30	52.74	160.77	39.90	10.1	172	99	нет	нет
21.09.2014	16:59:35	52.81	159.78	59.72	9.1	106	101	да	нет
22.09.2014	16:56:41	51.62	158.03	140.00	11.1	153	185	да	да
24.09.2014	03:59:30	52.68	159.30	87.14	12.1	80	116	да	да

Продолжение таблицы А.1

Дата	Время	Координаты, градусы		Глубина, км	Энергетический класс	Эпикентральное расстояние, км	Азимут, градусы	Аномалия направленности эмиссии вблизи землетрясения	
		Широта	Долгота					перед	после
29.09.2014	21:35:44	53.66	160.75	50.60	10.2	183	66	да	нет
01.10.2014	18:32:25	53.24	159.74	67.53	9.6	104	75	нет	нет
02.10.2014	12:57:04	52.18	158.37	148.00	14.0	90	174	да	да
05.10.2014	07:13:56	52.98	157.02	302.04	9.4	81	269	нет	нет
07.10.2014	17:21:24	53.48	159.65	87.16	9.3	109	60	да	да
08.10.2014	17:55:54	52.15	158.46	144.00	9.1	95	170	да	да
28.10.2014	03:24:13	52.20	159.25	27.83	9.6	111	142	нет	нет
11.11.2014	14:34:38	52.37	153.26	524.67	12.6	341	258	нет	нет
14.11.2014	06:09:40	52.13	161.16	62.35	11.2	220	116	да	да
28.11.2014	09:12:01	53.53	158.69	174.83	9.2	67	27	да	нет
02.12.2014	20:29:54	53.84	160.74	104.97	11.5	191	60	да	да
08.12.2014	09:52:01	50.26	158.27	66.25	12.8	303	179	да	нет
08.12.2014	23:55:46	52.20	159.42	44.85	9.1	119	137	да	нет
18.12.2014	14:29:00	52.69	160.60	35.34	10.9	162	102	да	да

Продолжение таблицы А.1

Дата	Время	Координаты, градусы		Глубина, км	Энергетический класс	Эпикентральное расстояние, км	Азимут, градусы	Аномалия направленности эмиссии вблизи землетрясения	
		Широта	Долгота					перед	после
19.12.2014	19:54:37	52.68	160.67	19.28	10.3	167	102	да	да
21.12.2014	17:40:57	52.77	159.83	47.90	9.1	110	103	да	да
23.12.2014	22:33:09	52.02	158.91	55.31	12.0	117	157	да	нет
24.12.2014	00:07:26	53.28	160.64	47.90	10.5	164	79	нет	да
01.01.2015	07:34:56	52.79	160.81	40.40	10.2	174	97	да	да
08.01.2015	08:17:09	52.59	159.75	51.30	11.1	111	113	да	да
09.01.2015	21:43:38	54.11	159.78	139.10	10.2	161	39	да	да
24.01.2015	00:16:54	52.66	160.48	41.00	10.1	155	104	да	да
03.02.2015	04:06:03	52.69	160.77	39.19	10.9	174	101	да	да
04.02.2015	19:31:58	52.66	160.77	23.85	11.2	174	102	да	да
15.02.2015	15:22:00	52.13	160.58	58.59	10.2	185	121	да	нет
19.02.2015	16:32:46	52.69	159.3	89.89	13.8	79	115	да	нет
23.02.2015	00:45:54	52.70	159.29	89.84	9.9	78	114	нет	да
26.02.2015	13:35:32	51.73	159.15	40.31	11.0	153	156	нет	нет

Продолжение таблицы А.1

Дата	Время	Координаты, градусы		Глубина, км	Энергетический класс	Эпицентральное расстояние, км	Азимут, градусы	Аномалия направленности эмиссии вблизи землетрясения	
		Широта	Долгота					перед	после
02.03.2015	00:44:17	52.57	158.09	150.44	9.2	48	191	нет	нет
07.03.2015	07:17:40	53.48	157.79	228.00	9.5	62	332	нет	нет
07.03.2015	05:06:09	53.62	160.30	81.99	10.1	154	63	нет	нет
13.03.2015	06:46:14	51.91	160.77	75.51	12.1	209	125	да	нет
19.03.2015	03:15:22	53.50	162.07	45.52	12.2	261	77	да	да
23.03.2015	11:29:00	51.95	159.41	39.98	10.1	140	145	да	нет
24.03.2015	11:09:16	53.55	161.87	56.47	12.3	249	75	нет	нет
24.03.2015	13:18:59	53.54	162.05	48.50	12.1	261	76	нет	нет
10.04.2015	11:56:07	52.91	160.16	48.66	12.5	129	94	да	да
11.04.2015	03:59:51	51.72	153.70	467.41	12.4	338	246	нет	нет
03.05.2015	14:23:33	52.53	159.32	60.38	9.4	89	125	да	да
03.06.2015	00:41:40	52.42	159.08	54.58	9.4	85	138	нет	нет
05.06.2015	21:48:06	52.58	160.48	49.57	10.7	158	107	нет	нет
18.06.2015	23:56:29	53.48	160.75	52.51	11.4	176	72	нет	нет

Продолжение таблицы А.1

Дата	Время	Координаты, градусы		Глубина, км	Энергетический класс	Эпикентральное расстояние, км	Азимут, градусы	Аномалия направленности эмиссии вблизи землетрясения	
		Широта	Долгота					перед	после
21.06.2015	12:59:51	52.62	159.76	52.42	9.5	111	112	нет	нет
22.06.2015	23:26:12	53.46	157.68	20.25	11.0	64	325	нет	нет
29.06.2015	02:58:15	53.86	160.33	100.00	10.7	169	55	нет	нет
01.07.2015	04:07:59	51.93	157.97	160.00	9.9	119	189	нет	нет
23.08.2015	10:17:04	52.64	161.05	19.41	11.8	193	102	да	да
28.08.2015	15:08:29	51.92	157.17	184.19	11.7	139	211	да	нет
31.08.2015	05:04:36	52.61	160.99	41.23	10.7	190	103	да	да
01.09.2015	15:51:57	53.59	159.32	141.62	9.4	98	47	да	да
01.09.2015	04:48:05	50.33	157.27	43.88	12.6	303	193	нет	нет
14.09.2015	18:49:11	53.28	157.95	180.83	9.1	37	330	да	да
16.09.2015	23:59:18	53.07	159.57	84.00	9.3	90	84	да	да
17.09.2015	08:58:41	53.08	160.16	62.00	13.3	129	59	да	да
17.09.2015	11:36:11	52.03	158.95	60.29	9.1	117	155	да	да
02.10.2015	05:28:17	53.02	160.39	40.72	10.2	144	87	нет	нет

Продолжение таблицы А.1

Дата	Время	Координаты, градусы		Глубина, км	Энергетический класс	Эпикентральное расстояние, км	Азимут, градусы	Аномалия направленности эмиссии вблизи землетрясения	
		Широта	Долгота					перед	после
19.10.2015	06:29:36	53.05	160.59	48.01	10.5	158	88	да	да
01.11.2015	06:56:24	52.48	159.44	40.08	9.2	99	125	да	да
12.11.2015	13:54:52	51.39	158.90	60.54	12.3	183	165	да	да
15.11.2015	23:17:12	52.39	159.36	49.80	11.7	101	131	да	нет
18.11.2015	14:14:32	52.61	158.85	104.00	9.3	59	135	нет	да
19.11.2015	11:56:10	51.60	158.97	59.88	12.5	162	162	да	да
10.12.2015	19:15:01	52.43	159.30	59.78	10.0	95	131	да	да
15.12.2015	04:41:40	52.79	160.27	46.51	10.1	138	99	да	нет
16.12.2015	08:20:16	52.37	159.21	72.12	11.4	95	136	да	да
30.01.2016	03:25:08	53.79	159.08	185.25	15.7	105	32	да	нет
31.01.2016	11:20:44	52.70	160.68	28.31	10.3	167	101	нет	нет
31.01.2016	18:53:26	53.75	159.05	175.00	9.6	100	33	нет	нет
01.01.2016	22:47:48	54.98	162.37	45.24	12.2	349	50	нет	нет
02.02.2016	21:37:32	53.72	159.06	171.8	10.2	98	34	нет	нет

Продолжение таблицы А.1

Дата	Время	Координаты, градусы		Глубина, км	Энергетический класс	Эпикентральное расстояние, км	Азимут, градусы	Аномалия направленности эмиссии вблизи землетрясения	
		Широта	Долгота					перед	после
05.02.2016	19:02:33	53.16	158.12	174.00	9.6	20	339	нет	нет
09.02.2016	02:12:57	52.94	159.55	70.14	10.6	88	94	да	да
09.02.2016	08:38:29	52.14	160.62	53.90	10.4	187	120	нет	да
11.02.2016	14:22:37	51.93	158.82	53.96	10.2	124	161	да	да
14.02.2016	07:31:19	53.82	159.03	178.08	10.3	106	30	да	да
17.02.2016	01:17:59	52.59	160.57	28.32	10.1	163	106	нет	да
25.02.2016	07:37:06	50.12	156.99	66.21	12.3	330	195	да	да
03.03.2016	16:30:25	52.52	159.66	41.05	9.2	109	118	да	да
13.03.2016	18:42:52	53.79	159.05	175.93	11.3	104	31	да	да
14.03.2016	12:36:12	52.82	159.82	59.81	9.1	108	100	да	да
14.03.2016	21:50:25	53.08	160.08	57.74	11.2	124	85	да	да
20.03.2016	15:18:45	53.81	159.11	185.24	10.7	108	32	да	да
20.03.2016	22:50:17	54.13	163.14	43.20	14.9	347	68	да	да
22.03.2016	12:48:12	51.62	158.33	100.66	11.1	152	177	да	да

Продолжение таблицы А.1

Дата	Время	Координаты, градусы		Глубина, км	Энергетический класс	Эпикентральное расстояние, км	Азимут, градусы	Аномалия направленности эмиссии вблизи землетрясения	
		Широта	Долгота					перед	после
25.03.2016	21:36:23	54.19	163.17	63.30	12.5	352	67	да	да
05.04.2016	09:34:24	52.22	153.51	501.19	12.4	329	255	нет	нет
09.04.2016	04:02:53	52.15	158.82	92.72	9.7	101	157	нет	нет
14.04.2016	03:06:07	53.66	161.11	47.67	13.9	205	69	нет	да
16.04.2016	13:50:04	50.82	157.49	69.24	11.7	246	192	да	да
20.04.2016	17:10:30	51.26	158.41	47.62	10.5	192	176	да	да
05.05.2016	22:33:57	49.52	157.03	16.39	12.2	394	193	да	да
06.05.2016	21:48:44	53.09	159.11	128.00	9.4	60	79	да	да
09.05.2016	21:35:06	51.86	158.48	116.00	10.0	127	172	нет	нет
10.05.2016	15:46:20	53.1	160.69	40.56	10.2	165	86	нет	нет
15.05.2016	04:13:42	51.53	158.17	80.40	11.9	162	181	да	да
21.05.2016	11:04:56	53.05	158.95	140.00	9.8	49	82	да	да
27.05.2016	14:41:43	53.29	159.48	123.07	9.9	90	68	да	да
31.05.2016	06:53:46	53.15	159.98	56.51	9.8	118	81	да	да

Продолжение таблицы А.1

Дата	Время	Координаты, градусы		Глубина, км	Энергетический класс	Эпицентральное расстояние, км	Азимут, градусы	Аномалия направленности эмиссии вблизи землетрясения	
		Широта	Долгота					перед	после
23.06.2016	23:30:18	52.79	159.78	44.31	9.5	106	102	нет	нет
28.06.2016	3:17:14	53.25	159.94	85.59	12.2	118	76	да	да
28.06.2016	09:32:31	55.21	159.59	43.45	12.6	262	19	да	да
30.06.2016	15:20:23	52.41	156.52	290.00	11.4	132	241	да	да
03.07.2016	00:39:48	52.87	157.41	298.44	9.3	56	256	нет	нет
08.07.2016	21:45:20	53.72	160.39	95.43	10.5	164	60	нет	нет
08.07.2016	22:27:23	53.25	159.44	108.66	9.8	86	70	нет	нет
14.07.2016	06:34:46	52.59	161.12	45.46	12.6	199	103	да	да
30.07.2016	18:12:47	53.43	157.60	264.00	9.5	64	320	нет	нет
05.08.2016	20:09:19	50.68	157.96	44.99	11.8	257	184	нет	нет
10.08.2016	12:17:23	52.66	159.73	50.56	11.8	107	110	нет	нет
10.08.2016	16:51:42	52.67	159.72	56.32	11.0	106	110	нет	нет
10.08.2016	18:07:49	52.67	159.60	43.39	10.6	99	111	нет	нет
12.08.2016	01:14:59	52.66	159.65	45.16	9.8	102	111	да	да

Продолжение таблицы А.1

Дата	Время	Координаты, градусы		Глубина, км	Энергетический класс	Эпикентральное расстояние, км	Азимут, градусы	Аномалия направленности эмиссии вблизи землетрясения	
		Широта	Долгота					перед	после
13.08.2016	02:25:49	51.99	158.23	112.54	10.4	111	180	да	да
17.08.2016	12:21:03	53.20	159.58	111.88	11.2	93	75	нет	нет
26.08.2016	06:50:41	52.85	159.58	104.17	9.6	92	100	нет	нет
29.08.2016	04:08:48	53.13	160.02	57.60	10.6	120	83	нет	нет
04.09.2016	15:40:18	49.61	156.10	80.25	12.1	403	202	нет	нет
21.09.2016	17:21:02	53.67	159.08	169.62	10.2	94	37	нет	нет
04.10.2016	01:47:48	53.05	160.34	48.31	11.1	141	87	нет	нет
14.10.2016	21:28:44	52.23	158.33	132.00	10.3	85	175	да	да
29.10.2016	02:33:41	53.19	156.50	339.43	9.1	117	281	нет	нет
06.11.2016	02:37:49	54.13	158.67	260.32	10.6	129	13	нет	нет
06.11.2016	22:00:37	52.38	159.12	92.91	9.2	90	138	нет	нет
25.11.2016	07:26:22	54.30	160.93	91.95	13.5	230	50	нет	нет
01.12.2016	05:16:25	52.16	158.36	108.03	11.3	93	175	да	да
02.12.2016	01:16:05	51.39	157.95	90.65	11.9	179	186	да	да

Продолжение таблицы А.1

Дата	Время	Координаты, градусы		Глубина, км	Энергетический класс	Эпикентральное расстояние, км	Азимут, градусы	Аномалия направленности эмиссии вблизи землетрясения	
		Широта	Долгота					перед	после
02.12.2016	12:26:09	50.76	158.01	48.75	11.5	248	184	да	да
03.12.2016	00:23:41	52.6	158.82	81.63	9.0	59	137	нет	нет
08.12.2016	06:55:02	51.76	156.47	204.85	10.1	181	222	да	да
08.12.2016	19:36:08	53.34	158.06	259.20	11.3	40	344	да	да
21.12.2016	23:55:49	52.94	160.56	43.82	11.6	156	92	нет	нет
30.12.2016	17:13:20	52.82	159.97	54.45	12.2	118	99	нет	нет

Таблица А.2 – Аномалии направленности, связанные только с одним землетрясением

Дата	Время	Координаты, градусы		Глубина, км	Энергетический класс	Эпикентральное расстояние, км	Азимут, градусы	Время между появлением аномалии и землетрясением, ч	Длительность аномалии, ч			Направления ярко выраженных максимумов, градусы
		Широта	Долгота						Общая	Перед землетрясением	После землетрясения	
03.11.2008	21:40:03	51.60	159.73	10.18	12.1	187	146	23.75	25.60	23.75	1.85	35
19.11.2008	08:25:02	53.04	160.02	39.68	11.6	120	87	18.47	21.90	18.47	3.43	22; 50; 220
24.11.2008	18:44:18	52.87	159.96	49.44	12.0	117	97	36.73	53.08	36.73	16.35	45; 225
03.12.2008	11:37:05	52.84	159.95	42.47	12.2	114	98	24.98	37.35	24.98	12.37	45; 230
13.12.2008	01:25:43	52.18	158.94	75.25	10.2	100	152	48.65	36.22	36.22	0.00	100
04.07.2009	04:35:40	54.45	160.49	80.49	10.2	220	184	7.35	32.97	7.35	25.62	55; 214
22.07.2009	21:06:05	51.36	159.67	27.53	11.2	205	150	17.73	88.05	17.73	70.32	165; 235
28.10.2009	08:36:25	53.44	160.91	5.01	11.5	185	74	30.65	31.68	30.65	1.03	40; 150; 220
06.12.2009	22:31:40	52.66	159.93	22.63	11.2	120	108	29.10	29.23	29.10	0.13	0; 225
27.02.2010	01:17:00	52.41	159.18	61.07	10.8	91	135	12.17	57.03	12.17	44.87	45; 55
26.03.2010	00:19:54	54.91	160.95	110.91	10.6	277	39	12.33	22.62	12.33	10.28	310
02.06.2010	13:16:28	53.28	160.10	69.93	9.6	129	75	33.75	55.68	33.75	21.93	50; 135; 315
03.07.2010	18:22:06	53.22	160.46	53.70	10.3	151	80	42.07	64.68	42.07	22.62	45; 150; 330
11.07.2010	18:09:34	52.76	159.80	53.42	10.3	108	104	109.90	141.57	109.90	31.67	155; 320

Продолжение таблицы А.2

Дата	Время	Координаты, градусы		Глубина, км	Энергетический класс	Эпикентральное расстояние, км	Азимут, градусы	Время между появлением аномалии и землетрясением, ч	Длительность аномалии, ч			Направления ярко выраженных максимумов, градусы
		Широта	Долгота						Общая	Перед землетрясением	После землетрясения	
29.07.2010	01:39:36	52.30	160.37	44.29	10.1	163	118	47.67	71.60	47.67	23.93	40; 330
02.08.2010	09:36:00	53.29	160.68	59.79	11.0	16	78	18.90	39.50	18.90	20.60	160; 225; 315
15.08.2010	02:10:35	53.24	160.74	56.12	12.9	170	81	41.45	43.73	41.45	2.28	40; 150; 250
25.09.2010	23:53:07	53.30	159.66	81.68	10.6	101	70	34.50	37.62	34.50	3.12	10; 50
03.02.2011	01:46:35	53.42	159.05	146.60	10.2	72	49	14.35	124.30	14.35	109.95	45; 340
26.03.2011	12:15:09	53.67	160.89	53.89	11.6	192	67	3.65	51.38	3.65	47.73	350
13.05.2011	13:21:24	53.72	160.78	55.54	11.1	187	64	39.38	131.03	39.38	91.65	0; 325
30.06.2011	20:59:43	53.25	160.70	48.09	10.7	167	80	10.68	25.72	10.68	15.03	20; 60
16.07.2011	19:33:13	53.35	157.85	216.00	9.3	47	328	14.30	11.75	11.75	0.00	35; 190
10.10.2011	01:14:56	51.98	159.72	71.48	13.0	151	138	14.25	64.50	14.25	50.25	25
09.11.2011	22:00:58	52.24	160.24	50.35	13.2	159	121	75.78	95.78	75.78	20.00	320
15.12.2011	13:18:30	52.51	159.89	54.18	11.6	124	115	28.32	9.72	9.72	0.00	0; 240
01.01.2012	06:11:38	50.90	159.11	54.62	11.9	240	165	21.20	80.22	21.20	59.02	18; 150; 340
27.01.2012	08:57:27	52.03	159.39	40.16	11.9	132	143	31.08	88.25	31.08	57.17	318

Продолжение таблицы А.2

Дата	Время	Координаты, градусы		Глубина, км	Энергетический класс	Эпикентральное расстояние, км	Азимут, градусы	Время между появлением аномалии и землетрясением, ч	Длительность аномалии, ч			Направления ярко выраженных максимумов, градусы
		Широта	Долгота						Общая	Перед землетрясением	После землетрясения	
30.05.2012	21:22:28	54.42	169.96	46.16	12.8	291	57	13.15	21.30	13.15	8.15	110; 335
09.06.2012	12:02:43	51.38	159.89	43.05	12.5	211	147	67.83	87.57	67.83	19.73	40; 135; 335
25.06.2012	21:16:01	50.67	157.42	55.89	12.2	263	192	109.98	110.15	109.98	0.17	140; 320
24.09.2012	14:39:52	52.83	159.61	64.50	11.1	94	101	60.98	58.05	58.05	0.00	35; 115
24.11.2012	11:52:23	51.43	159.47	61.38	11.9	193	154	10.78	14.85	10.78	4.07	40; 100; 150
04.12.2012	20:17:38	53.78	160.51	109.99	10.6	175	60	36.58	52.82	36.58	16.23	45; 250
17.12.2012	03:10:05	51.87	159.12	63.58	10.3	138	154	29.63	46.53	29.63	16.90	0; 40
05.01.2013	10:21:04	53.44	157.48	290.91	9.2	71	315	79.88	120.62	79.88	40.73	45
31.01.2013	16:42:27	52.94	156.70	270.00	9.1	102	267	16.20	44.98	16.20	28.78	120; 315
02.09.2013	08:19:01	52.45	160.08	45.44	12.2	138	116	33.28	45.75	33.28	12.47	320
20.09.2013	01:02:01	51.66	153.78	471.10	12.1	336	244	21.45	43.33	21.45	21.88	320
28.10.2013	02:02:21	52.62	160.07	48.16	10.2	130	108	20.80	16.08	0.00	16.08	315
23.11.2013	00:52:54	53.56	160.80	56.46	10.4	182	70	22.08	37.65	0.00	37.65	320
26.11.2013	03:05:32	52.64	160.87	41.81	10.5	181	102	57.68	31.57	31.57	0.00	320

Продолжение таблицы А.2

Дата	Время	Координаты, градусы		Глубина, км	Энергетический класс	Эпикентральное расстояние, км	Азимут, градусы	Время между появлением аномалии и землетрясением, ч	Длительность аномалии, ч			Направления ярко выраженных максимумов, градусы
		Широта	Долгота						Общая	Перед землетрясением	После землетрясения	
28.11.2013	07:39:09	51.94	159.06	56.13	11.0	129	154	24.33	33.33	24.33	9.00	320
15.12.2013	03:07:06	53.65	160.92	53.09	12.6	193	68	9.12	6.18	6.18	0.00	320
31.01.2014	16:39:04	54.55	160.02	177.00	12.8	209	34	85.63	33.40	33.40	0.00	60
05.02.2014	02:38:52	53.47	160.78	51.79	11.5	52	72	15.83	59.82	15.83	43.98	180
11.02.2014	12:46:38	52.75	160.78	41.84	10.8	173	99	6.40	60.40	6.40	54.00	170
10.03.2014	14:32:48	52.06	157.82	136.00	11.5	107	195	6.97	24.17	6.97	17.20	5; 56
02.04.2014	12:33:13	53.30	160.58	47.53	10.1	160	78	4.85	16.32	4.85	11.47	170; 260
22.05.2014	17:03:55	52.36	159.63	40.85	10.0	117	126	3.40	131.82	0.00	131.82	20; 250; 315
07.06.2014	13:11:35	50.55	157.33	65.65	13.3	278	193	62.47	89.55	62.47	27.08	30; 350
15.06.2014	14:49:26	52.21	158.86	81.20	11.3	96	154	76.48	130.10	76.48	53.62	5; 130; 280
14.07.2014	18:52:49	52.50	159.79	51.09	9.5	118	117	23.15	17.27	17.27	0.00	220
15.07.2014	05:48:11	52.04	160.73	59.86	11.7	199	122	2.98	13.02	2.98	10.03	228
02.08.2014	17:30:25	53.27	160.80	39.06	10.9	174	80	94.35	132.10	94.35	37.75	53; 265
29.09.2014	21:35:43	53.66	160.75	50.60	10.2	183	66	30.68	9.12	9.12	0.00	185

Дата	Время	Координаты, градусы		Глубина, км	Энергетический класс	Эпикентральное расстояние, км	Азимут, градусы	Время между появлением аномалии и землетрясением, ч	Длительность аномалии, ч			Направления ярко выраженных максимумов, градусы
		Широта	Долгота						Общая	Передземлетрясением	Послеземлетрясением	
02.10.2014	12:57:04	52.18	158.37	148.00	14.0	90	174	6.03	31.87	6.03	25.83	50; 160
14.11.2014	06:09:40	52.13	161.16	62.35	11.2	220	116	10.87	63.20	10.87	52.33	75; 160; 295
08.12.2014	09:52:01	50.26	158.27	66.25	12.8	303	179	64.40	71.25	64.40	6.85	50; 80; 165; 220
01.01.2015	07:34:55	52.79	160.81	40.40	10.2	174	97	16.03	19.38	16.03	3.35	255; 285
08.01.2015	08:17:08	52.59	159.75	51.30	11.1	111	113	64.82	74.60	64.82	9.78	145
09.01.2015	21:43:37	54.11	159.78	139.10	10.2	161	39	21.12	28.63	21.12	7.52	145; 200; 275
03.02.2015	04:06:03	52.69	160.77	39.19	10.9	174	101	43.43	44.98	43.43	1.55	295
04.02.2015	19:31:57	52.66	160.77	23.85	11.2	174	102	33.78	92.22	33.78	58.43	80
15.02.2015	15:22:00	52.13	160.58	58.59	10.2	185	121	88.78	64.43	64.43	0.00	265
19.02.2015	16:32:45	52.69	159.30	89.89	13.8	79	115	96.78	54.20	54.20	0.00	315
13.03.2015	06:46:13	51.91	160.77	75.51	12.1	209	125	104.75	60.03	60.03	0.00	315
23.08.2015	10:17:03	52.64	161.05	19.41	11.8	193	102	9.42	20.92	9.42	11.50	50
28.08.2015	15:08:28	51.92	157.17	184.19	11.7	139	211	109.85	47.97	47.97	0.00	65; 165

Дата	Время	Координаты, градусы		Глубина, км	Энергетический класс	Эпипентральное расстояние, км	Азимут, градусы	Время между появлением аномалии и землетрясением, ч	Длительность аномалии, ч			Направления ярко выраженных максимумов, градусы
		Широта	Долгота						Общая	Перед землетрясением	После землетрясения	
01.09.2015	15:51:57	53.59	159.32	141.62	9.4	98	47	32.97	43.92	32.97	10.95	80; 170; 280
16.12.2015	08:20:15	52.37	159.21	72.12	11.4	95	136	4.90	30.40	4.90	25.50	15; 285
30.01.2016	03:25:08	53.79	159.08	185.25	15.7	105	32	14.80	14.73	14.73	0.00	285; 340
09.02.2016	08:38:29	52.14	160.62	53.90	10.4	187	120	60.62	13.27	0.00	13.27	30; 330
17.02.2016	01:17:59	52.59	160.57	28.32	10.1	163	106	5.30	59.43	0.00	59.43	280
15.05.2016	04:13:42	51.53	158.17	80.40	11.9	162	181	5.33	16.78	5.33	11.43	0
21.05.2016	11:04:56	53.05	158.95	140.00	9.8	49	82	1.78	16.33	1.78	14.55	145; 308
30.06.2016	15:20:22	52.41	156.52	290.00	11.4	132	241	33.63	51.23	33.63	17.62	15; 135
14.07.2016	06:34:46	52.59	161.12	45.46	12.6	199	103	13.52	55.18	13.52	41.67	135; 335
14.10.2016	21:28:44	52.23	158.33	132.00	10.3	85	175	21.78	101.77	21.78	79.98	95; 250
01.12.2016	05:16:24	52.16	158.36	108.03	11.3	93	175	20.88	53.92	20.88	33.03	80
08.12.2016	06:55:02	51.76	156.47	204.85	10.1	181	222	7.45	11.20	7.45	3.75	275
08.12.2016	19:36:08	53.34	158.06	259.20	11.3	40	344	8.15	21.00	8.15	12.85	315