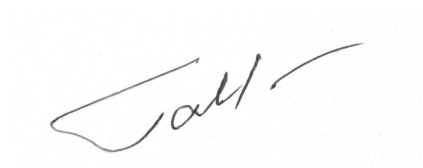


*На правах рукописи*



**Гаврилов Валерий Александрович**

**ВОЗДЕЙСТВИЕ ПЕРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ  
НА ГЕОАКУСТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ:  
ЭМПИРИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ФИЗИЧЕСКИЕ  
МЕХАНИЗМЫ**

Специальность - 25.00.10

Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Петропавловск-Камчатский  
2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИВиС ДВО РАН)

**Официальные оппоненты:** **Турунтаев Сергей Борисович**, доктор физико-математических наук, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер Российской академии наук, г. Москва

**Родкин Михаил Владимирович**, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории теории прогноза землетрясений Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук, г. Москва

**Зейгарник Владимир Альбертович**, доктор технических наук, заместитель директора по научной работе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного Института высоких температур Российской академии наук, г. Москва

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», г. Нижний Новгород

**Защита диссертации состоится** 25 мая 2017 г. в 14.00 на заседании Диссертационного совета Д 002.001.01 на базе Федерального Государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН) по адресу: 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, строение 1, 3-й этаж, конференц-зал.

**С диссертацией можно ознакомиться** в научной библиотеке ИФЗ РАН и на сайте <http://www.ifz.ru/>. Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации <http://vak.ed.gov.ru/> и на сайте ИФЗ РАН.

**Отзывы на автореферат**, заверенные печатью, в 2-х экземплярах направлять по адресу: 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, ИФЗ РАН, ученому секретарю Диссертационного совета Владимиру Анатольевичу Камзолкину.

**Автореферат разослан** «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

Учёный секретарь Диссертационного совета,  
кандидат геолого-минералогических наук



В.А. Камзолкин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Сложившийся к концу 70-х годов XX века переход к концепции «геофизической среды» (работы М.А. Садовского, Л.Г. Болховитинова, В.Ф. Писаренко, А.В. Николаева и других исследователей) поставил ряд новых проблем, связанных с исследованием геофизических процессов, проходящих в сложных нелинейных энергонасыщенных средах. С самого начала к числу наиболее актуальных были отнесены такие направления исследований как изучение фрактальной структуры геофизической среды (геосреды), раскрытие механизмов модулирующего влияния различных слабых внешних воздействий на интенсивность геоакустических процессов, исследование влияния на тензочувствительность горных пород наличия в их структуре различных мезо- и микронеоднородностей. В ходе проводимых исследований достаточно быстро стало очевидным не только фундаментальное, но и большое прикладное значение получаемых результатов. Среди наиболее актуальных и интересных научных направлений, имеющих также и прикладное значение, следует указать на исследования эффектов модулирующего воздействия различных физических процессов и полей на интенсивность геоакустической эмиссии (ГАЭ). (Под модуляцией ГАЭ в данном случае понимается процесс, следствием которого являются изменения амплитуды ГАЭ по закону более низкочастотного воздействующего процесса). ГАЭ является примером проявления внутренней энергетики геосреды и по этой причине изменения ГАЭ под влиянием ряда внешних факторов отражает изменения состояния геосреды.

В значительной мере толчком к активизации работ этого направления послужило открытие Л.Н. Рыкуновым, О.Б. Хаврошкиным и В.В. Цыплаковым эффекта модулирующего воздействия приливных деформаций на интенсивность ГАЭ. На начальном этапе вокруг указанного открытия возникла острая научная полемика. При этом сомнения в реальности эффекта модуляции сейсмических шумов приливными деформационными процессами были в значительной мере связаны с высоким уровнем помех в местах регистрации, поскольку результаты были получены при измерениях на дневной поверхности. Дальнейшие исследования эффекта модуляции сейсмических шумов приливными деформационными процессами не только подтвердили реальность эффекта, но также показали перспективность работ этого направления для задач мониторинга напряженно-деформированного состояния геосреды сейсмоактивных регионов. Исследования, связанные с эффектом модуляции сейсмических шумов приливными деформационными процессами, фактически явились первыми работами, показавшими целесообразность и актуальность исследований влияния различных внешних процессов и факторов на характеристики ГАЭ. Сильная реакция ГАЭ на приливные деформации, имеющие порядок  $10^{-8}$ , а также ряд других результатов, полученных в ходе

натурных измерений, указывают на высокую тензочувствительность геоакустических процессов. С этим выводом согласуются и данные лабораторных экспериментов с образцами горных пород, а также результаты специально организованных натурных экспериментов.

Кроме результатов, связанных с эффектом модуляции ГАЭ различными *деформационными* процессами, в конце прошлого столетия по результатам скважинных геоакустических измерений на глубинах до 3200 м коллективом под руководством чл.-корр. РАН А.В. Николаева (Институт физики Земли РАН) были получены данные, указывающие на суточные вариации уровня ГАЭ, период которых составлял ровно 24 ч. В августе 2000 г. по инициативе А.В. Николаева автором были начаты постоянные скважинные геоакустические измерения на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне с установкой геофона МАГ-3С в скважине Г-1 на глубине 1035 м. Полученные при этом результаты подтвердили наличие суточных вариаций ГАЭ, причинами которых не могли быть факторы экзогенного происхождения, связанные с шумами дневной поверхности. Между тем, попытки объяснения указанного эффекта модулирующим воздействием деформационных процессов, например, лунно-солнечных приливов, натолкнулись на очевидные противоречия.

По результатам первого этапа скважинных геоакустических измерений на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне автором была высказана гипотеза, связывающая суточные вариации ГАЭ с модулирующим влиянием внешнего электромагнитного излучения (ЭМИ) в зоне измерительной скважины. Исследование физической основы модулирующего воздействия на интенсивность ГАЭ слабых (с амплитудами напряженности электрического поля  $E \leq 100$  мВ/м) переменных электромагнитных полей явилось главной темой диссертационной работы.

Актуальность темы исследований имеет теоретический и прикладной аспекты.

Учитывая, что ГАЭ непосредственно связана с наиболее характерными свойствами геофизической среды, исследование геоакустических процессов по данным измерений в достаточно глубоких скважинах, т.е. *in situ*, может служить базой для значительного повышения уровня знаний о динамике геофизических процессов, протекающих в сейсмоактивных зонах.

Актуальность прикладного аспекта темы исследований определяется необходимостью и возможностью использования скважинных геоакустических и электромагнитных измерений для развития методов геофизического мониторинга напряженно-деформированного состояния геосреды сейсмоактивных регионов. Отметим, что методы мониторинга напряженно-деформированного состояния не являются собственно методами прогноза землетрясений. Вместе с тем, необходимость их использования в региональных системах среднесрочного и краткосрочного прогнозирования текущей сейсмической опасности представляется очевидной,

поскольку именно эти методы способны обеспечить требуемую для физически обоснованных прогнозов информационную основу, связанную с изменениями напряженно–деформированного состояния геосреды в контролируемой зоне.

### ***Цели и задачи исследований***

1. Установление физических причин, обуславливающих суточные вариации амплитуды ГАЭ по данным скважинных геоакустических измерений.
2. Установление механизма, объясняющего модулирующее воздействие слабых электромагнитных сверхнизкочастотных (СНЧ) полей на интенсивность ГАЭ.
3. Установление физических причин изменений амплитуд окликов ГАЭ на воздействие слабых электромагнитных СНЧ полей во временных окрестностях сильных землетрясений.
4. Оценка перспективности скважинных геоакустических и электромагнитных измерений для развития методов комплексного геофизического мониторинга напряженно–деформированного состояния геосреды и прогноза землетрясений.

***Методология и методы исследований.*** Главный акцент в работе сделан на анализе результатов многолетних измерений, полученных автоматизированной сетью непрерывных комплексных скважинных геофизических измерений Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона. Такой подход определялся пониманием крайней сложности геофизических процессов, проходящих в нелинейных энергонасыщенных геосредах. В этой ситуации анализ комплексных геофизических измерений *in situ*, становится ***отправной точкой*** для дальнейших теоретических исследований.

Сеть непрерывных комплексных скважинных геофизических измерений Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона была создана по инициативе, под руководством и при непосредственном участии автора. При ее создании автор придерживался следующих основных принципов.

1. Геоакустические (и не только) измерения в *достаточно глубоких скважинах* во многих случаях позволяют рассчитывать на получение результатов, практически недостижимых при измерениях на поверхности.
2. В целях минимизации влияния на результаты измерений различных локальных факторов геоакустические и электромагнитные измерения должны проводиться одновременно на нескольких *территориально разнесенных измерительных пунктах*.
3. *Комплексность* измерений рассматривалась как необходимое условие для успешного решения задач, связанных с исследованием физической основы эффектов модулирующего воздействия слабых электромагнитных излучений на интенсивность ГАЭ. При выборе видов измерений, *дополняющих* скважинные геоакустические и электромагнитные измерения, приоритет отдавался видам и методам измерений, данные которых могли иметь ясный

физический смысл. При этом учитывалась специфика конкретных видов измерений, как правило, делающая нецелесообразным слишком широкое комплексирование различных видов измерений на одном измерительном пункте. По этой причине при создании сети скважинных измерений Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона требование комплексности относилось не к каждому измерительному пункту, а к сети в целом.

**Дополнительные направления исследований.** В дополнение к комплексным скважинным измерениям на Петропавловск–Камчатском геодинамическом полигоне для исследования физической основы эффектов модулирующего воздействия слабых электромагнитных излучений на интенсивность ГАЭ проводились: *лабораторные эксперименты по физическому моделированию* эффектов модулирующего воздействия электромагнитных полей на интенсивность ГАЭ с образцами горных пород; ряд *натурных экспериментов* на скважинах Петропавловск–Камчатского геодинамического полигона; *натурный эксперимент* на Бишкекском геодинамическом полигоне с *искусственным источником электромагнитного воздействия* (совместно с сотрудниками Научной станции РАН в г. Бишкеке).

Обобщение результатов, получаемых в рамках вышеуказанных направлений работ, осуществлялось в ходе *теоретических исследований*.

**Научная новизна.** Важнейшие научные результаты, полученные впервые:

1. Установлено неизвестное ранее явление модулирующего воздействия слабых электромагнитных СНЧ полей на интенсивность геоакустической эмиссии горных пород в условиях их естественного залегания.
2. Предложен и описан физический механизм, объясняющий модулирующее воздействие слабых электромагнитных СНЧ полей на интенсивность ГАЭ.
3. Показано, что изменения амплитуд окликов ГАЭ на воздействие слабых электромагнитных СНЧ полей связаны с изменениями напряженно–деформированного состояния геосреды в зоне измерений.
4. Установлено, что наиболее значимым фактором, влияющим на изменения амплитуд окликов ГАЭ на внешнее электромагнитное воздействие во временных окрестностях сильных землетрясений, является суммарная площадь соприкосновения жидкой и твердой фаз в порово–трещинном пространстве контролируемой геофоном шумовой зоны, определяющая общее число потенциальных источников ГАЭ в указанной зоне.
5. Показано, что в случаях, когда порово–трещинное пространство шумовой зоны геофона содержит значительное число капилляров переменного сечения, и при этом радиусы многих капилляров соизмеримы с толщиной двойных электрических слоев, значимое влияние на амплитуды откликов ГАЭ могут оказывать также электрокинетические процессы.

6. Установлено, что при достаточно высокой влагонасыщенности контролируемой геофоном шумовой зоны изменения трендовой составляющей рядов ГАЭ отражают изменения скорости фильтрации жидкого флюида. В случае экстремально низкой флюидонасыщенности пород изменения трендовой составляющей рядов ГАЭ связаны, в основном, с изменениями величин сил трения скольжения между гранулами пород и бортами существующих трещин.

7. Показано, что общепланетарный эффект суточной периодичности слабых землетрясений, выражающийся в возрастании числа слабых землетрясений в темное время суток, может быть обусловлен воздействием на геосреду естественного электромагнитного излучения СНЧ диапазона частот.

8. Показано, что в рамках решавшихся задач применение подземных вертикальных электрических антенн, основным конструктивным элементом которых является обсадная колонна скважины, имеет ряд ощутимых преимуществ перед наземными антеннами.

9. Разработан новый метод непрерывного мониторинга удельного сопротивления пород прискважинной зоны, где в качестве зондирующего сигнала используется непрерывное фоновое электромагнитное излучение техногенного или природного происхождения, а в качестве датчиков – подземные электрические антенны.

10. Показано, что разработанные методы комплексного геофизического мониторинга напряженно-деформированного состояния геосреды, основой которых являются данные скважинных геоакустических измерений и измерений с подземными электрическими антеннами, могут с успехом использоваться в региональных системах среднесрочного и краткосрочного прогноза землетрясений.

**Личный вклад автора.** Перечисленные выше научные результаты получены лично автором. Результаты, показывающие влияние на амплитуды откликов ГАЭ электрокинетических процессов (см. пункт 5), были получены в соавторстве с И.А. Пантелеевым (Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь), производившим построение модели и расчеты значений плотности электрокинетического тока. Автором определялась стратегия исследований, связанных с определением физических причин и механизмов, способных оказывать модулирующее воздействие на интенсивность ГАЭ. Под его руководством и при непосредственном участии была создана сеть комплексных скважинных геофизических измерений Петропавловск–Камчатского геодинамического полигона, осуществлялась разработка аппаратно–программных средств, разрабатывались методики обработки и анализа данных скважинных геоакустических измерений. Автор принимал непосредственное участие в обработке данных многолетних временных рядов комплексных скважинных измерений, организовывал проведение натурных экспериментов на скважинах Петропавловск–Камчатского геодинамического полигона и проводил анализ полученных при

этом результатов. Диссертант принимал участие в организации и проведении натурных экспериментов на Бишкекском геодинамическом полигоне, а также в ряде лабораторных экспериментов с образцами горных пород в Институте механики сплошных сред УрО РАН. Им лично написано более двух третей объема публикаций по теме диссертации.

**Теоретическая значимость работы** связана, в первую очередь, с открытием эффекта модулирующего воздействия слабых электромагнитных СНЧ полей на интенсивность геоакустической эмиссии горных пород в условиях их естественного залегания, а также с установлением и описанием физического механизма этого эффекта. Значительный вклад в теоретические представления о физических закономерностях и особенностях механизмов генерации ГАЭ вносят также результаты анализа физических причин и механизмов, обуславливающих изменения амплитуд откликов ГАЭ на электромагнитное воздействие на различных стадиях напряженно–деформированного состояния геосреды, в том числе, во временных окрестностях сильных тектонических землетрясений.

**Прикладное значение работ.** Результаты исследований с 2002 г. используются для развития методов геофизического мониторинга напряженно–деформированного состояния геосреды сейсмоактивных регионов. С 2009 г. новые методы комплексного геофизического мониторинга напряженно–деформированного состояния геосреды, основу которых составляют геоакустические скважинные измерения и электромагнитные измерения с подземными антеннами, активно используются для подготовки заключений о сейсмической опасности для Камчатского края. С января 2014 года в Институте вулканологии ДВО РАН функционирует служба оперативной обработки текущей информации, поступающей по каналам телеметрии с измерительных пунктов сети комплексных скважинных измерений Петропавловск–Камчатского геодинамического полигона, созданная автором на базе руководимого им подразделения. Одной из основных задач службы является подготовка регулярных (в обычном режиме – каждые две недели) заключений о сейсмической опасности для Камчатского края. С февраля 2013 г. по январь 2016 г. в реальном времени по данным комплексных скважинных измерений на Петропавловск–Камчатском геодинамическом полигоне были сделаны четыре успешных прогноза сильных камчатских землетрясений, в том числе, прогноз сильнейшего ( $M_w=7.2$ ) Жупановского землетрясения, произошедшего 30.01.2016 г. на эпицентральной  $Re=107$  км от г. Петропавловска-Камчатского. Предполагается, что новые методы комплексного геофизического мониторинга напряженно–деформированного состояния геосреды, базирующиеся на геоакустических скважинных измерениях и электромагнитных измерениях с подземными антеннами, могут быть адаптированы для применения и на других геодинамических полигонах.

### ***Основные защищаемые положения***

1. Выявлен ранее неизвестный эффект модулирующего воздействия слабых электромагнитных СНЧ полей на интенсивность геоакустической эмиссии горных пород в условиях их естественного залегания.

2. Установлен и описан предполагаемый физический механизм модулирующего воздействия электромагнитных СНЧ полей на интенсивность геоакустической эмиссии горных пород в условиях их естественного залегания.

3. Установлено, что изменения амплитуд откликов ГАЭ на внешнее электромагнитное воздействие во временных окрестностях относительно сильных землетрясений связаны с изменениями напряженно-деформированного состояния геосреды в зоне измерений, приводящих к изменениям объема, влагонасыщенности и суммарной площади соприкосновения жидкой и твердой фаз порово-трещинного пространства контролируемой геофоном шумовой зоны. При определенных параметрах порово-трещинного пространства шумовой зоны значимое влияние на амплитуды откликов ГАЭ могут оказывать также электрокинетические процессы.

4. Разработанные методы комплексного геофизического мониторинга напряженно-деформированного состояния геосреды, основой которых являются данные скважинных геоакустических измерений и измерений с подземными электрическими антеннами, перспективны для использования в региональных системах среднесрочного и краткосрочного прогноза землетрясений.

5. Эффект модулирующего воздействия на интенсивность геоакустических процессов слабых электромагнитных СНЧ полей имеет общепланетарный масштаб ввиду повсеместного наличия электромагнитного СНЧ излучения атмосферного происхождения.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных форумах:

- ***на международных конференциях, совещаниях и симпозиумах:***

VI Международной научно-технической конференции «Современные методы и средства океанологических исследований» (Москва, 2000); Международной геофизической конференции «Проблемы сейсмологии III-го тысячелетия» (Новосибирск, 2003); XIII Генеральной Ассамблеи IUGG (Япония, Саппоро, 2003); IV Международном совещании по субдукционным процессам в Японской, Курило-Камчатской и Алеутской островных дугах «Взаимосвязь между тектоникой, сейсмичностью, магмообразованием и извержениями вулканов в вулканических дугах» (Петропавловск-Камчатский, 2004); II Международном симпозиуме "Активный геофизический мониторинг литосферы Земли" (Новосибирск, 2005); Третьем международном симпозиуме «Геодинамика и геоэкология высокогорных регионов в XXI веке» (Бишкек, Кыргызстан, 2005);

IV, V, VI Международных конференциях «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений» (с. Паратунка Камчатского края, 2007, 2010, 2013, 2016); Международной геологической конференции «Изменяющаяся геологическая среда: пространственно-временные взаимодействия эндогенных и экзогенных процессов» (Казань; 2007); Четырнадцатой международной конференции «Связь поверхностных структур земной коры с глубинными» (Петрозаводск, 2008); IV Международном симпозиуме «Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и геоэкологические проблемы» (Бишкек, Кыргызстан, 2008); V Международном симпозиуме «Современные проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов» (Бишкек, Кыргызстан, 2011); VII, VIII, IX, X Международных школах–семинарах «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород» (Борок, 2005, Санкт-Петербург, 2010, Иркутск, 2013, Апатиты, 2016); Международном научно-практическом семинаре «Мониторинг окружающей среды-2012» (Севастополь, 2012); VIII международном семинаре по процессам субдукции JKASP-2014 (Japan, Sapporo, 2014); Международной конференции «Современные информационные технологии для фундаментальных научных исследований в области наук о Земле» (Петропавловск-Камчатский, 2014); XIII международной конференции «Физико–химические и петрофизические исследования в науках о Земле» (Москва - Борок, 2012); VI Российско-Китайском научном форуме «Проблемы нелинейной геомеханики на больших глубинах» (Апатиты, 2016);

- ***на всероссийских и межрегиональных симпозиумах и конференциях:***

II и IV Всероссийских симпозиумах «Сейсмоакустика переходных зон» (Владивосток, 2001, 2005); XVI, XX, XXV сессиях Российского Акустического Общества (Москва, 2005, 2008, Таганрог, 2012); Всероссийской конференции «Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. К 40-летию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН» (Москва, 2008); IV Всероссийском симпозиуме по вулканологии и палеовулканологии (Петропавловск-Камчатский, 2009); Научной конференции, посвященной 65-летию Института морской геологии и геофизики ДВО РАН «Геодинамические процессы и природные катастрофы в Дальневосточном регионе» (Южно-Сахалинск, 2011); Научной конференции «Сессия научного совета РАН по акустике» (Таганрог, 2012); Третьей тектонофизической конференции в ИФЗ РАН «Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле» (Москва, 2012); Третьей молодежной тектонофизической школе-семинаре (Москва, 2013); XI Всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Казань, 2015);

- ***на региональных конференциях:***

Научно-технической конференции «Геофизический мониторинг Камчатки» (Петропавловск-Камчатский, 2006); Региональной научно-технической конференции «Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России»

(Петропавловск–Камчатский, 2007); II, III, IV, V Региональных научно-технических конференциях «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России» (Петропавловск-Камчатский, 2009, 2011, 2013, 2015).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 77 работ, в том числе: 24 статьи в ведущих научных рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК при Минобрнауки России, три статьи в зарубежных изданиях, включенных в систему цитирования Web of Science, разделы в трех коллективных монографиях.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объем диссертации 385 страниц текста с 132 рисунками, четырьмя таблицами и четырьмя приложениями. Список литературы содержит 253 наименования.

**Благодарности.** Автор признателен член-корр. РАН А.В. Николаеву, по инициативе которого были начаты скважинные геоакустические измерения на Камчатке, а также А.С. Белякову и В.С. Лаврову за помощь в организации измерений. Искреннюю признательность автор выражает член-корр. РАН Г.А. Соболеву за внимание к работе и значительное влияние на формирование представлений автора о физике исследовавшихся процессов. Представленные в диссертации результаты не могли бы быть получены без помощи и непосредственного участия в многолетних исследованиях коллег по работе Ю.Ю. Бусс, Ю.А. Власова, В.П. Денисенко, Ю.В. Морозовой, Е.В. Полтавцевой, О.В. Федористова, которым автор выражает благодарность и признательность. Автор благодарен сотрудникам Камчатского филиала ГС РАН Г.В. Рябинину и А.В. Наумову за многочисленные дискуссии, способствовавшие более глубокому пониманию целого ряда вопросов. Полезные замечания, способствовавшие улучшению содержания диссертации, автор получал от коллег по работе в ИВиС ДВО РАН И.Ф. Делемена, И.В. Мелекесцева, М.А. Магуськина, А.Ю. Озерова. Автор выражает признательность директорам института, в котором в течение многих лет проводились исследования - академику С.А. Федотову и академику Е.И. Гордееву - за поддержку работ по комплексным скважинным измерениям. Автор благодарен соавторам публикаций, в сотрудничестве с которыми был получен ряд интересных научных результатов: Л.М. Богомолу, А.В. Дещеревскому, В.И. Журавлеву, А.С. Закупину, С.Ф. Тимашеву, Ю.С. Полякову, А.Я. Сидорину, А.В. Сторчеусу, А.К. Троянову. Особую признательность как соавтору публикаций автор приносит И.А. Пантелееву, плодотворное сотрудничество с которым позволило более глубоко вникнуть в решение ряда актуальных научных задач. Значительную положительную роль сыграла поддержка и интерес к работе со стороны коллег из ИФЗ РАН, ИКИР ДВО РАН, ИПФ РАН, ФТИ РАН, ОИВТ РАН, НС РАН, МИТПЗ РАН: А.А. Авагимова, В.В. Богданова, И.Н. Диденкулова, А.Д. Завьялова, А.И. Малеханова, М.В. Родкина, Н.Т. Тарасова, которым автор также выражает свою искреннюю признательность.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### Глава 1. Геоакустическая эмиссия и ее связь с напряженно-деформированным состоянием геосреды

*В разделе 1.1* рассмотрены наиболее характерные и важные с позиций темы исследований черты геосреды сейсмоактивных регионов. Под термином «геосреда» имеется в виду «геофизическая» среда в понимании М.А. Садовского и его последователей. Обобщая представления о геофизической среде, выделяются следующие наиболее характерные и важные с позиций темы исследований черты геосреды сейсмоактивных регионов: блочно-иерархическая структура геосреды, энергонасыщенность геосреды, наличие компонент флюида в жидкой и газовой фазах, изменение физических свойств геосреды во времени под действием различных процессов эндогенного и экзогенного происхождения. Подчеркивается, что физическая нелинейность, под которой понимается нелинейность связи напряжений и деформаций, является следствием структурных особенностей геосреды - ее неоднородности, трещиноватости, пористости и других дефектов структуры разных масштабных уровней. Как отмечается А.В. Николаевым, значительное влияние на степень нелинейности характеристик геосреды оказывает также ее текущее напряженное состояние. К важнейшему свойству практически всех горных пород относится наличие микронеоднородных неоднородностей, общим свойством которых является их многократно более высокая по сравнению с окружающим однородным материалом «мягкость» (податливость). По этой причине объемы геосреды с развитыми микронеоднородными неоднородностями с мягкими включениями типа трещин должны характеризоваться высокой тензочувствительностью и быть перспективными для мониторинга напряженно-деформированного состояния геосреды.

*В разделе 1.2* делается краткий обзор современных представлений об источниках ГАЭ, обусловленных естественными эндогенными процессами внутри геосреды. В общем случае эндогенные процессы, с которыми могут быть связаны основные источники ГАЭ, по мнению автора, условно можно разделить на две группы.

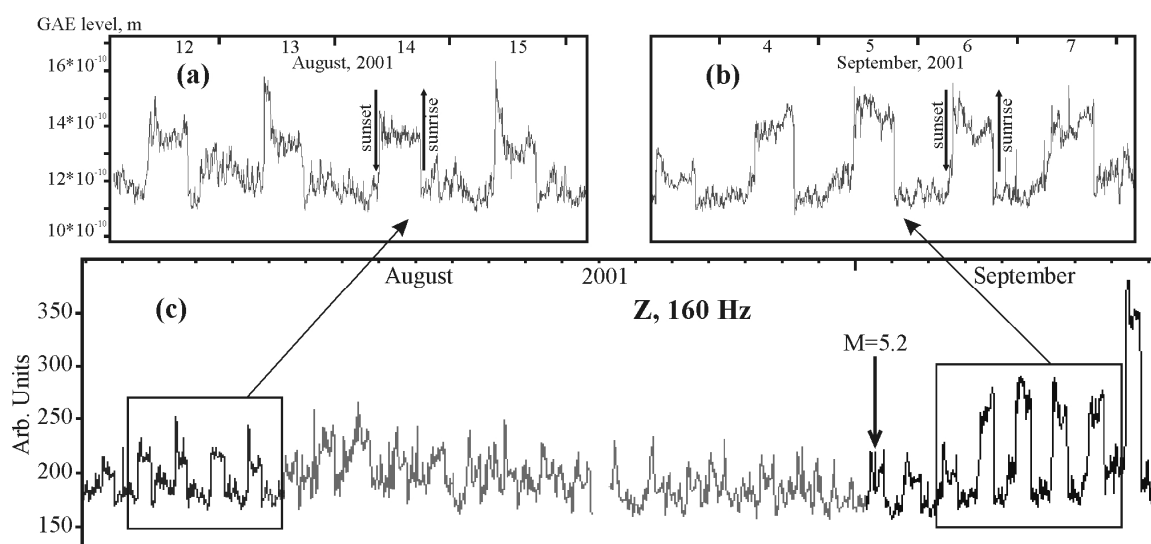
Во-первых, это процессы переупаковки, фрагментации, консолидации и компакций в блочной геосреде, сопровождаемые трением, подрастанием и закрытием микро- и макротрещин, схлопыванием пор, происходящие непрерывно в геосреде под воздействием тектонических напряжений, приливов, литостатического давления, сейсмических волн. К этой группе можно также отнести процессы перемещения дислокаций при переходе границы двух сред с разными модулями упругости (работы В.С. Бойко, В.Д. Нацик, К.А. Чишко) и процессы двойникования (работы Д.К. Шатемирова, К.Т. Тилегенова). Во-вторых, как показывают исследования последних лет, не в меньшей степени основные источники ГАЭ могут быть

связаны с движением жидкой фазы (флюида) в порово-трещинном пространстве геосреды, что следует, в частности, из работ К.С. Басниева с коллегами. Касаясь фильтрационных процессов, в разделе 1.2 автор подчеркивает, что роль этих процессов как источника ГАЭ и индикатора геодинамических процессов в геоакустических измерениях представляется к настоящему времени значительно недооцененной. Нельзя не учитывать, что исследуемые геоакустические процессы, как правило, происходят в двухфазной среде (твердая порода – жидкий флюид). В этой связи повсеместность фоновых геоакустических шумов, включая асейсмичные районы, в значительной мере может объясняться повсеместностью процессов фильтрации. Крайне высока роль фильтрационных процессов и как индикатора геодинамических процессов. В работах И.Г. Киссина отмечается высокая тензочувствительность флюидонасыщенных сред, проявляющаяся как реакция на изменения напряженно-деформированного состояния геосреды, в ходе которых происходят изменения проницаемости геосреды, перераспределение поровых давлений и последующая интенсификация фильтрационных процессов. Представленные в диссертации результаты показывают, что указанные процессы достаточно адекватно отражаются в данных скважинных геоакустических измерений.

**В разделе 1.3** обосновывается необходимость проведения геоакустических измерений в *достаточно глубоких скважинах*. Анализ спектров плотности мощности ГАЭ, полученных при геоакустических измерениях в скважине Р-2 на глубине 730 м, а также при измерениях на других скважинах Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона, показывает, что спектры ГАЭ соответствуют фликкер-шуму. Такой характер спектра ГАЭ С.Ф. Тимашевым, Г. Шустером, П. Баком и многими другими исследователями связывается как с фрактальными свойствами геосреды, так и с ее энергонасыщенностью и постоянством колебательных движений в широкой полосе частот. В этой связи исследование *in situ* геоакустических процессов представляется базой для значительного повышения уровня знаний о динамике геофизических процессов, протекающих в сейсмоактивных зонах.

**В разделе 1.4** делается краткий обзор результатов натурных геоакустических измерений, а также данных лабораторных экспериментов, иллюстрирующих модулирующее воздействие различных физических процессов на уровень ГАЭ: возбуждение ГАЭ под воздействием сейсмических волн от землетрясений; модуляцию уровня ГАЭ медленными деформационными процессами в литосфере Земли; модуляцию ГАЭ штормовыми микросейсмами; модулирующее воздействие на уровень ГАЭ деформационных процессов приливного происхождения. Также обсуждаются возможные физические причины изменений интенсивности ГАЭ *до* и *после* землетрясений. Показывается перспективность ряда направлений для задач мониторинга напряженно-деформированного состояния геосреды сейсмоактивных регионов.

**В заключительной части главы 1 (раздел 1.5)** обсуждаются первые результаты скважинных геоакустических измерений на Камчатке. Измерения были начаты автором в августе 2000 г. по инициативе чл.-корр. РАН А.В. Николаева (ИФЗ РАН) с установкой геофона МАГ-3С в скважине Г-1 на глубине 1035 м. По результатам измерений было установлено наличие в рядах ГАЭ суточных вариаций с периодом ровно 24 ч с максимумом в ночное время. Кроме этого было установлено, что перед достаточно сильными сейсмическими событиями имеет место деградация суточных вариаций ГАЭ (Рис. 1).



**Рис. 1.** Примеры суточных вариаций ГАЭ (врезки (а), (б)) по результатам геоакустических измерений (вертикальная компонента Z, частотный канал 160 Гц) в скважине Г-1 на глубине 1035 м. Время UT (-13 час в сравнении с местным временем). (Согласно [Gavrilov et al., 2008])

Наличие суточных вариаций с периодом ровно 24 ч в рядах данных скважинных геоакустических измерений отмечается в многочисленных публикациях коллектива под руководством А.В. Николаева. Такие результаты были получены в ходе широкополосных скважинных измерений, проводившихся с 1985 г. в различных районах на глубинах до 3200 м с использованием высокочувствительных геофонов типа МАГ. В своих работах авторы связывают суточные вариации ГАЭ («подземного фонового звука» (ПФЗ) по терминологии авторов) с воздействием лунно-солнечных приливов<sup>1</sup>. Однако, как показано в диссертации, объяснение физических причин вариаций ГАЭ, имеющих период ровно 24 ч, воздействием приливных деформаций наталкивается на очевидные противоречия, и полученные результаты указывают на то, что приливные компоненты ГАЭ и компонента ГАЭ с периодом 24.0 ч имеют разный генезис.

Основные результаты Главы 1 опубликованы в статьях [3, 10, 15, 16, 20, 23, 24, 25].

<sup>1</sup>А.С. Беляков, В.С. Лавров, А.В. Николаев, Л.Л. Худзинский Подземный фоновый звук и его энергетическая модель как компоненты системы прогноза землетрясений // Физика Земли. – 2002. – № 8. – С. 57-64.

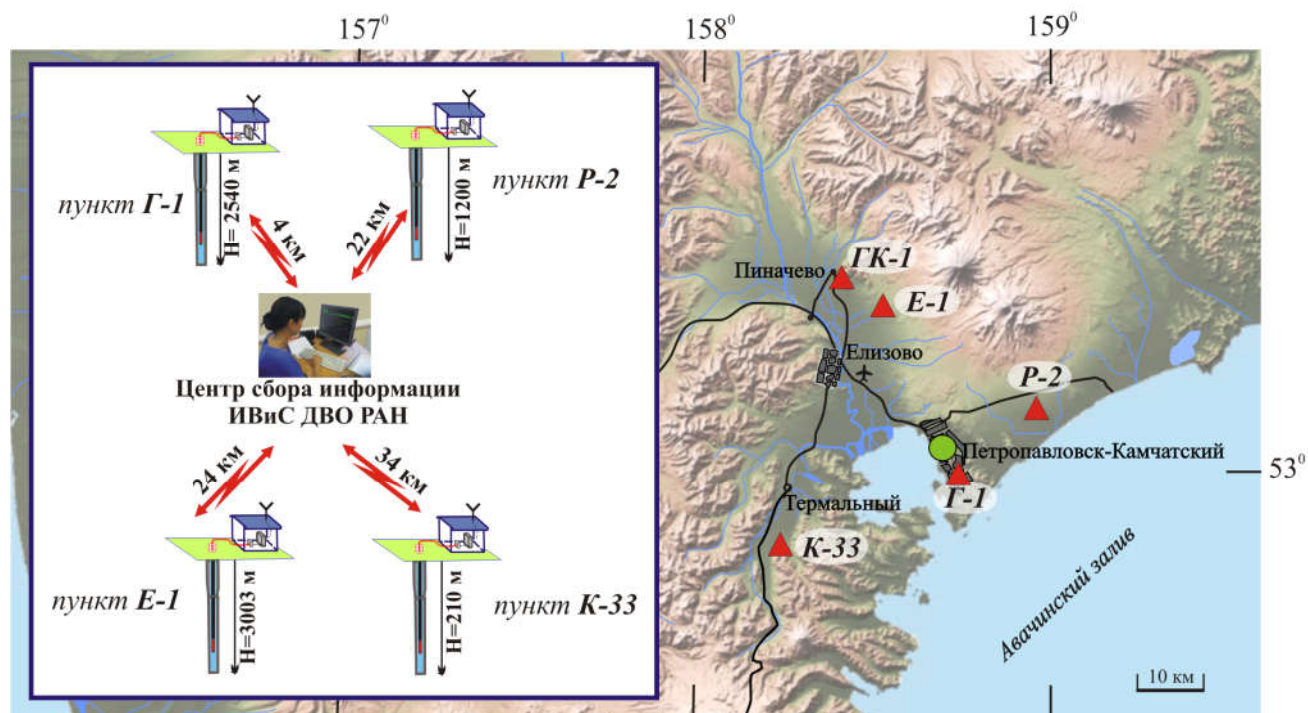
## **Глава 2. Методы, подходы и техническая база исследований влияния электромагнитных излучений на характеристики геоакустической эмиссии**

Многолетние работы, связанные с темой диссертации, условно можно разделить на два основных этапа. На первом этапе практически все решаемые задачи были связаны с исследованием физической основы эффектов модулирующего воздействия слабых электромагнитных излучений на интенсивность ГАЭ. На втором этапе на основе научных результатов, полученных в ходе первого этапа, также получило развитие прикладное направление, связанное с разработкой новых методов непрерывного мониторинга напряженно-деформированного состояния геосреды, базирующихся на синхронных скважинных геоакустических и электромагнитных измерениях. В соответствии с содержанием работ по этапам менялись методы и подходы к решаемым задачам, а также и техническая база исследований. Вместе с тем, на всем протяжении работ главный акцент делался на результаты *непрерывных комплексных скважинных геофизических измерений*. Геоакустические (и не только) измерения в достаточно глубоких скважинах во многих случаях позволяют рассчитывать на получение результатов, практически недостижимых при измерениях на поверхности. *Комплексность* измерений рассматривалась как необходимое условие для успешного решения задач, связанных с исследованием физической основы эффектов модулирующего воздействия слабых электромагнитных излучений на интенсивность ГАЭ.

**В разделе 2.1.** приводятся основные данные о сети комплексных скважинных измерений Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона, созданной по инициативе, под руководством и при непосредственном участии автора. В том числе, дается общая геолого-геофизическая характеристика Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона, приводятся данные о составе проводимых на скважинах измерений, геологическом строении участков измерительных скважин, их конструкциях и особенностях.

**Раздел 2.2** посвящен *техническому и методическому обеспечению* сети комплексных скважинных измерений Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона (Рис. 2). По состоянию на июль 2015 г. сеть состояла из четырех непрерывно функционирующих радиотелеметрических пунктов, созданных на базе скважин Г-1, Р-2, Е-1, К-33 и Центра сбора и обработки информации, расположенного в ИВиС ДВО РАН в г. Петропавловске-Камчатском. В начале 2016 г. были начаты работы по автоматизации измерений на пункте ГК-1. Базовыми измерениями, проводимыми в непрерывном режиме на каждом измерительном пункте сети, являются геоакустические и электромагнитные измерения с подземными электрическими антеннами. Основным режимом измерений в сети является режим непрерывного мониторинга, обеспечивающий непрерывные геоакустические и электромагнитные измерения в полосе частот 10 Гц – 2500 Гц. В режиме реального времени обеспечивается предварительная

обработка текущих данных, что позволяет снизить объемы передаваемых данных примерно в 2000 раз. Передача данных с измерительных пунктов производится по запросу оператора Центра сбора и обработки информации (в обычном режиме - один раз в сутки).



**Рис. 2.** Конфигурация сети комплексных скважинных измерений Петропавловск–Камчатского геодинамического полигона:  $\Delta$  - скважинный измерительный пункт,  $\bullet$  - Центр сбора и обработки информации

При необходимости проведения специальных исследований, требующих регистрации волновых форм и спектров исходных сигналов, используется дополнительный *режим экспериментальных измерений*, обеспечивающий высокоточную регистрацию волновых форм исходных сигналов ГАЭ и ЭМИ в полосе частот от 5 Гц до 10 кГц. Для этих целей используются измерительные цифровые модули типа Zet220 производства ЗАО «Электронные технологии и метрологические системы».

Для скважинных геоакустических измерений на Петропавловск–Камчатском геодинамическом полигоне применялись *геофоны* двух типов, а также аналоговые и цифровые *гидрофоны*. На первом этапе работ для измерений использовались геофоны типа МАГ-3С с датчиками на основе магнитоупругих кристаллических ферромагнетиков, разработанные в Институте физики Земли РАН А.С. Беляковым. С сентября 2009 г. для измерений применяются скважинные трехкомпонентные геофоны, созданные по инициативе и под руководством автора, в которых используются пьезоэлектрические датчики типа А1612 производства ЗАО «Геоакустика». Многолетний опыт геоакустических измерений позволяет сделать вывод, что по совокупности параметров геофоны с датчиками типа А1612 имеют существенные

преимущества перед геофонами типа МАГ-3С за счет наличия надежного метрологического обеспечения, серийного производства, низкой чувствительности датчиков к переменному электромагнитному полю и значительно более низкой стоимости геофонов.

**В разделе 2.2.3** описываются *методика и техника электромагнитных измерений*, применявшихся при исследованиях на Петропавловск–Камчатском геодинамическом полигоне. Наиболее важной особенностью электромагнитных измерений, организованных автором на Петропавловск–Камчатском геодинамическом полигоне совместно со скважинными геоакустическими измерениями, является применение *подземных* электрических антенн, что позволяет проводить электромагнитные и геоакустические измерения *in situ* в одной и той же геосреде. Используются подземные вертикальные электрические антенны трех разных конструкций, основным конструктивным элементом которых являются обсадные колонны скважин. Для района скважины Р-2, расположенной на значительном удалении от техногенных источников ЭМИ, спектр ЭМИ определяется, в основном, электромагнитным излучением *естественного происхождения*, создаваемым атмосферно–электрическими разрядами, что требует использования достаточно чувствительных антенных систем. В этой связи для измерений на пункте Р-2 была применена высокочувствительная подземная электрическая антенна типа «монополь» с подземным рефлектором значительной площади. Для измерений на скважинах Г-1 и Е-1 была применена разработанная автором оригинальная подземная электрическая антенна, не требующая подземного рефлектора, что позволяет проводить измерения в условиях городской застройки. Данные электромагнитных измерений с подземными электрическими антеннами использовались в нескольких приложениях. На первом этапе работ совместные геоакустические и электромагнитные измерения позволили установить, что генезис регистрируемых суточных вариаций ГАЭ связан с воздействием на геосреду внешнего переменного электрического поля СНЧ диапазона. На последующих этапах исследований область применений результатов измерений с подземными электрическими антеннами существенно расширилась в связи с разработкой автором нового метода непрерывного мониторинга удельного сопротивления пород прискважинной зоны, где в качестве зондирующего сигнала используется непрерывное фоновое электромагнитное излучение техногенного или природного происхождения, а в качестве датчиков – подземные электрические антенны. Физическая основа разработанного автором *метода непрерывного мониторинга удельного сопротивления пород* прискважинной зоны изложена во второй части главы 2. Показывается, что изменения трендовой составляющей временных рядов данных измерений с подземной электрической антенной в СНЧ диапазоне в условиях реальной геосреды определяются, прежде всего, изменениями удельной электропроводности пород  $\sigma$ , связанной с коэффициентом поглощения выражением

$$\delta \cong 2\pi \sqrt{\frac{30\sigma}{\lambda}}, \text{ м}^{-1},$$

где  $\lambda$  – длина электромагнитной волны в воздухе,  $\sigma$  – удельная электропроводность геосреды.

В рамках разработанного метода в качестве зондирующего сигнала используется непрерывное фоновое электромагнитное излучение техногенного или природного происхождения. При измерениях в зоне скважины Г-1 в качестве такого излучения используется излучение в окрестностях частот 50 Гц и 150 Гц (см. раздел 3.2.1).

Исследование электромагнитной обстановки в зоне скважины Г-1 показало, что примерно 98% от общего уровня ЭМИ на частотах в окрестности 150 Гц составляет электромагнитное излучение, связанное с работой подстанции «Зеркальная» электросети 110 кВ, 50 Гц, расположенной примерно в 500 м от скважины Г-1. Как показал анализ многолетних данных об изменениях токовой нагрузки для подстанции «Зеркальная», (данные любезно представлены ОАО «Камчатэнерго»), наиболее значимые вариации токовой нагрузки подстанции «Зеркальная» имеют сезонный характер. При этом максимальные средние значения токовой нагрузки для холодного времени года примерно вдвое превышали ее минимальные значения для летнего времени, в то время как изменения уровней трендовых составляющих рядов ЭМИ для зоны скважины Г-1 во временных окрестностях сильных землетрясений доходили до 700%. Эти данные, а также отсутствие значимых корреляционных связей между соответствующими рядами данных, указывают на то, что значительные изменения уровней трендовых составляющих рядов ЭМИ не могут быть обусловлены изменениями токовой нагрузки промышленной электросети в зоне скважины Г-1. В этой связи на первом этапе исследований при обработке данных измерений в зоне скважины Г-1 вариации напряженности ЭМИ, используемого в качестве зондирующего излучения, не учитывались. На втором этапе электромагнитных измерений (2016 г.) в целях аппаратного контроля над уровнем воздействующего ЭМИ измерения с подземной электрической антенной в зоне скважины Г-1 были дополнены непрерывными измерениями с наземной электрической антенной.

Касаясь измерений с подземной электрической антенной на базе скважины Р-2, следует отметить, что в этом случае речь идет об измерениях *естественного* электромагнитного излучения СНЧ диапазона. В таком случае наибольшие значения амплитуды напряженности электрического поля на поверхности Земли можно оценить величинами, не превышающими 0.45÷1.0 мВ/м, что требует использования достаточно чувствительных антенных систем. Учитывая сложность создания высокочувствительной наземной антенны СНЧ диапазона в зоне скважины Р-2, для сравнения результатов измерений с подземной антенной использовались данные, получаемые Институтом космофизических исследований и распространения радиоволн

(ИКИР) ДВО РАН на пункте «Карымшина», расположенном в 61 км от скважины Р-2 в районе с достаточно низким уровнем промышленных помех.

*В заключительной части главы 2* делаются оценки глубин мониторинга удельного сопротивления пород для зоны скважины Г-1. Расчетные значения глубин мониторинга составили: 2250 м для частотного канала 30 Гц; 950 м для частотного канала 160 Гц; 400 м для частотного канала 560 Гц. Приводимые данные указывают, что в наибольшей степени результаты основных геоакустических измерений в скважине Г-1, проводимых на глубинах  $1000 \pm 200$  м, должны согласовываться с данными мониторинга удельного сопротивления пород для частотных каналов с центральными частотами 160 Гц и 30 Гц.

Основные результаты Главы 2 опубликованы в статьях [1, 3, 4, 14, 16, 25].

### **Глава 3. Проявление влияния электромагнитных воздействий на геоакустические процессы**

Основное содержание главы 3 связано с результатами исследований возможных физических причин, способных объяснить суточную периодичность интенсивности геоакустических процессов. В этой связи детально анализируются данные, полученные при измерениях в зонах скважин Г-1, Р-2 и К-33 Петропавловск–Камчатского геодинамического полигона.

*В разделе 3.1* обобщаются основные результаты, полученные при геоакустических измерениях в скважине Г-1 на глубине 1035 м на первом этапе исследований (2001-2003 гг.). Показывается, что по результатам измерений на этом этапе можно выделить два ключевых результата. Во-первых, было выявлено наличие четко выраженной суточной периодичности изменений интенсивности ГАЭ (суточный ход уровня ГАЭ). Второй, не менее важный результат указывал на то, что характер проявления указанного эффекта меняется во временных окрестностях достаточно сильных близких землетрясений. Как было выявлено по результатам долговременных измерений, за сутки – недели перед землетрясениями с магнитудами  $M \geq 5.0$  в зоне радиусом  $R \leq 300$  км от пункта наблюдений и землетрясениями с  $M \geq 5.5$  в зоне  $R \leq 550$  км суточный ход уровня ГАЭ нарушался (деградировал) (см. Рис. 1). Как показано в ряде публикаций автора, результаты этого этапа измерений показали очень высокую стабильность выявленного эффекта деградации суточных вариаций амплитуд ГАЭ перед землетрясениями. В частности, деградация суточных вариаций амплитуд ГАЭ имела место перед всеми землетрясениями с магнитудами  $M_{LH} \geq 5.0$ , произошедшими в зоне радиусом  $R \leq 300$  км от скважины Г-1 за период с 1.01.2001 г. по 31.07.2003 г., и землетрясениями с  $M_{LH} \geq 5.5$ , произошедшими за тот же период в зоне радиусом  $R \leq 550$  км (см. главу 5). Общее число таких землетрясений составило 36. Кроме нарушения суточного хода аномалии уровня ГАЭ также

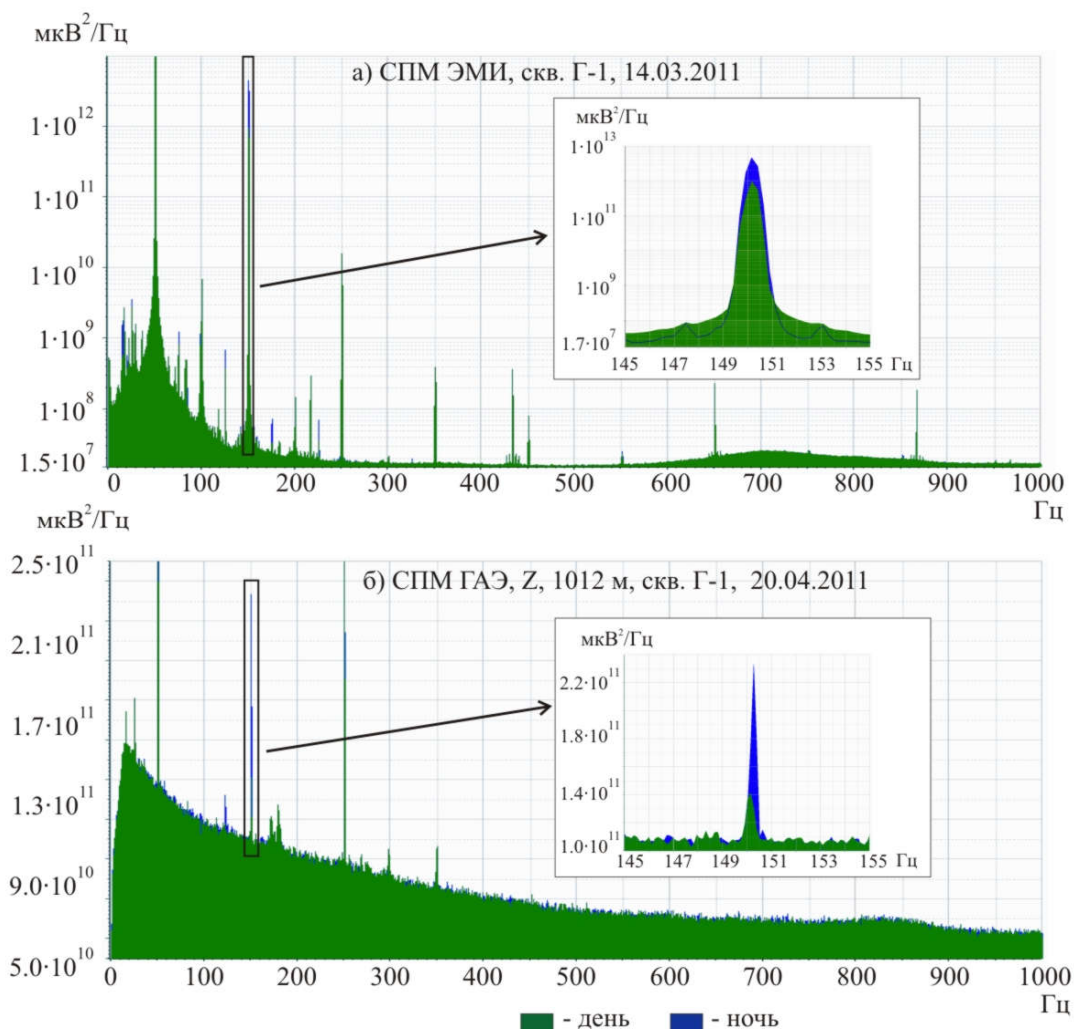
выражались в бухтообразных изменениях среднесуточного уровня ГАЭ (трендовых составляющих рядов ГАЭ).

**Раздел 3.2. Исследование возможных физических причин периодических вариаций уровня ГАЭ.** В работах А.С. Белякова, А.В. Николаева, В.С. Лаврова наличие суточных вариаций ГАЭ, регистрируемых при проведении скважинных измерений, объясняется изменениями величины модуля скорости изменения деформации от солнечной компоненты  $S_1$  земного прилива. Противоречия такого объяснения очевидны: если бы регистрируемые вариации уровня ГАЭ были следствием воздействия приливных деформаций, то наибольшую амплитуду имели бы отклики ГАЭ на самую интенсивную полусуточную компоненту лунно-солнечного прилива  $M_2$  ( $T=12.42$  ч). Учитывая, что этого по результатам измерений не наблюдается, можно сделать вывод, что генезис регистрируемых суточных вариаций ГАЭ не связан с воздействием приливных деформаций. Вместе с тем, указанное выше не означает отрицание возможности модулирующего воздействия приливных деформаций на геоакустическую эмиссию горных пород для глубин порядка 1000 м. В частности, как показали результаты исследований, проведенные под руководством и при непосредственном участии автора совместно с Е.В. Полтавцевой и Ю.А. Власовым, ряды данных долговременных (около четырех месяцев) непрерывных измерений ГАЭ в скважине Р-2 на глубине 730 м содержат периодические составляющие с периодами, соответствующими периодам приливных волн  $O_1$  и  $M_2$  (25.82 ч и 12.42 ч соответственно)<sup>2</sup>. Выбор в данном случае скважины Р-2 был обусловлен ее расположением в лесном массиве в 20 км от г. Петропавловска-Камчатского на значительном удалении от источников различных техногенных помех. Как показали результаты обработки данных геоакустических измерений в скважине Р-2, отклики ГАЭ на приливные компоненты имели очень низкие амплитуды, и их выделение из исходных рядов ГАЭ было бы невозможно без использования специального программного обеспечения. По результатам расчетов значения коэффициентов значимости для приливных периодичностей  $O_1$  и  $M_2$ , выделенных при помощи метода наложения эпох из исходных рядов ГАЭ, в несколько сотен раз превышали значения, рассчитанные для случайных рядов.

**Раздел 3.2.1. Измерения на базе скважины Г-1.** Детальные электромагнитные измерения с подземной вертикальной электрической антенной показывают, что основная часть спектра ЭМИ, регистрируемого в районе скважины Г-1, сосредоточена в полосе до 200 Гц, которая включает в себя компоненту с частотой промышленной сети 50 Гц, а также ее третью гармонику 150 Гц (Рис. 3а). Такой характер спектра ЭМИ связан с расположением скважины в

---

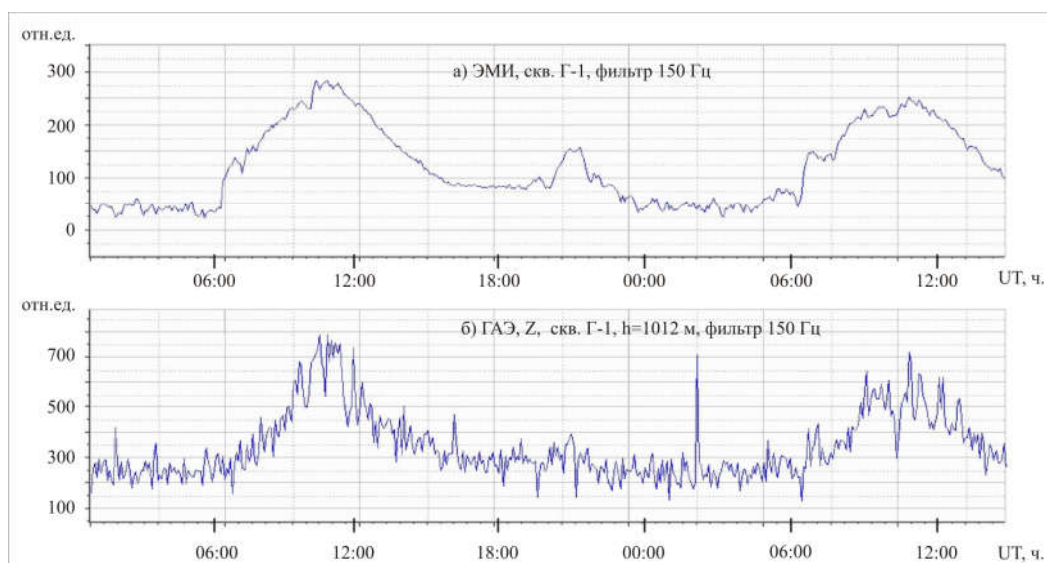
<sup>2</sup> Полтавцева Е.В., Власов Ю.А, Гаврилов В.А. Исследование откликов на приливное воздействие в рядах скважинных геоакустических измерений // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. - 2013. - № 2. - Вып. № 22. - С. 178 - 183.



**Рис. 3.** Спектры плотности мощности ЭМИ и ГАЭ (глубина 1012 м), характерные для скважины Г-1: (а) – спектры ЭМИ для разного времени суток; (б) - спектры ГАЭ (вертикальная компонента) для разного времени суток. (Согласно [Гаврилов и др., 2014])

черте города на небольшом удалении от различных источников и потребителей промышленной электроэнергии, в том числе, на удалении 500 м от подстанции электросети 110 кВ, 50 Гц. Компоненты 50 Гц и 150 Гц (Рис. 3а) имеют вид узкополосных пиков, небольшая размытость которых обусловлена флуктуациями частоты. Широкополосные пьедесталы в основаниях пиков обязаны своим происхождением флуктуациям амплитуды, а также корреляции между флуктуациями амплитуды и частоты. В спектре ЭМИ диапазона 200 – 1000 Гц четко выделяются две составляющие: фоновая составляющая, спектральная плотность которой незначительно меняется во всем указанном частотном диапазоне, и узкополосные компоненты, связанные, в основном, с гармониками частоты 50 Гц. По данным многолетних измерений темное время суток для района скважины Г-1 характеризуется стабильным повышением (примерно на 5 дБ) амплитуды компоненты 150 Гц в спектре ЭМИ в сравнении со светлым временем суток (Рис. 3а). Стабильное и значительное повышение амплитуды компоненты 150 Гц в спектре ЭМИ в темное время суток приводит к четко выраженным суточным вариациям

уровня ЭМИ на частотах, близких к 150 Гц (Рис. 4а). Спектр ГАЭ (Рис. 3б) значительно отличается от спектра ЭМИ, прежде всего, наличием хорошо выраженной флуктуационной



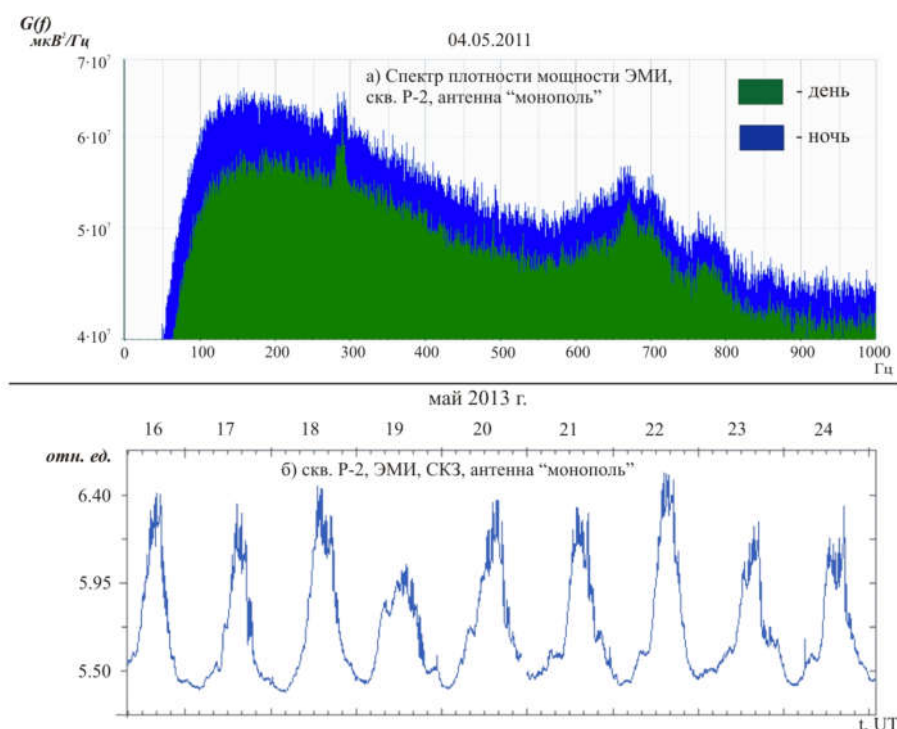
**Рис. 4.** Графики вариаций СКЗ ЭМИ и ГАЭ (глубина 1012 м), характерные для скважины Г-1: (а) - суточные вариации СКЗ ЭМИ при фильтрации третьоктавным фильтром с центральной частотой 150 Гц; (б) - суточные вариации СКЗ ГАЭ (вертикальная компонента) при фильтрации третьоктавным фильтром с центральной частотой 150 Гц. Интервал осреднения 5 мин. (Согласно [Гаврилов и др., 2014]). Время UT (-11 час в сравнении с местным временем)

составляющей спектра, спектральная плотность которой в диапазоне 20 – 600 Гц уменьшается с частотой по степенному закону. В спектрах ГАЭ хорошо видны узкополосные компоненты на частоте 50 Гц, а также на частотах ее третьей, пятой и седьмой гармоник. При этом характер изменений амплитуд указанных гармоник в спектре ГАЭ при переходе от светлого к темному времени суток совпадает с характером изменений в спектре ЭМИ. Стабильное повышение амплитуды компоненты 150 Гц в спектре ГАЭ в темное время суток приводит к четко выраженным суточным вариациям уровня ГАЭ (Рис. 4б).

**Раздел 3.2.2. Результаты измерений на базе скважины Р-2.** Для района скважины Р-2, расположенной в лесном массиве в 20 км от г. Петропавловска–Камчатского на значительном удалении от техногенных источников ЭМИ, спектр ЭМИ определяется, в основном, электромагнитным излучением *естественного происхождения*. Естественное электромагнитное излучение (ЕЭМИ) сверхнизкочастотного диапазона (0.01 – 1.0 кГц), регистрируемое на поверхности Земли, создается, в основном, атмосферно–электрическими разрядами. Излучение имеет вид случайных по форме и по времени квазипериодических импульсов (атмосфериков), следующих на фоне непрерывной флуктуационной составляющей. Уровень регистрируемого ЕЭМИ атмосферного происхождения в сверхнизкочастотном диапазоне, как правило, имеет четко выраженный суточный ход с максимумом в темное время

суток (работы М.С. Александра с соавторами; А.Б. Орлова, Г.В. Азарнина, Л.Т. Ремизова), что связано с улучшением условий распространения СНЧ излучения в это время суток за счет увеличения высоты ионосферы. Согласно данным, полученным Ю.М. Михайловым с соавторами, фоновый уровень потока атмосфериков на Камчатке определяется источниками с преимущественным направлением в створе углов  $200^{\circ}$ - $230^{\circ}$ . Наиболее вероятным основным источником атмосфериков в этом случае являются мировые центры гроз, расположенные в районе Индонезии (расстояние около 7000 - 7500 км).

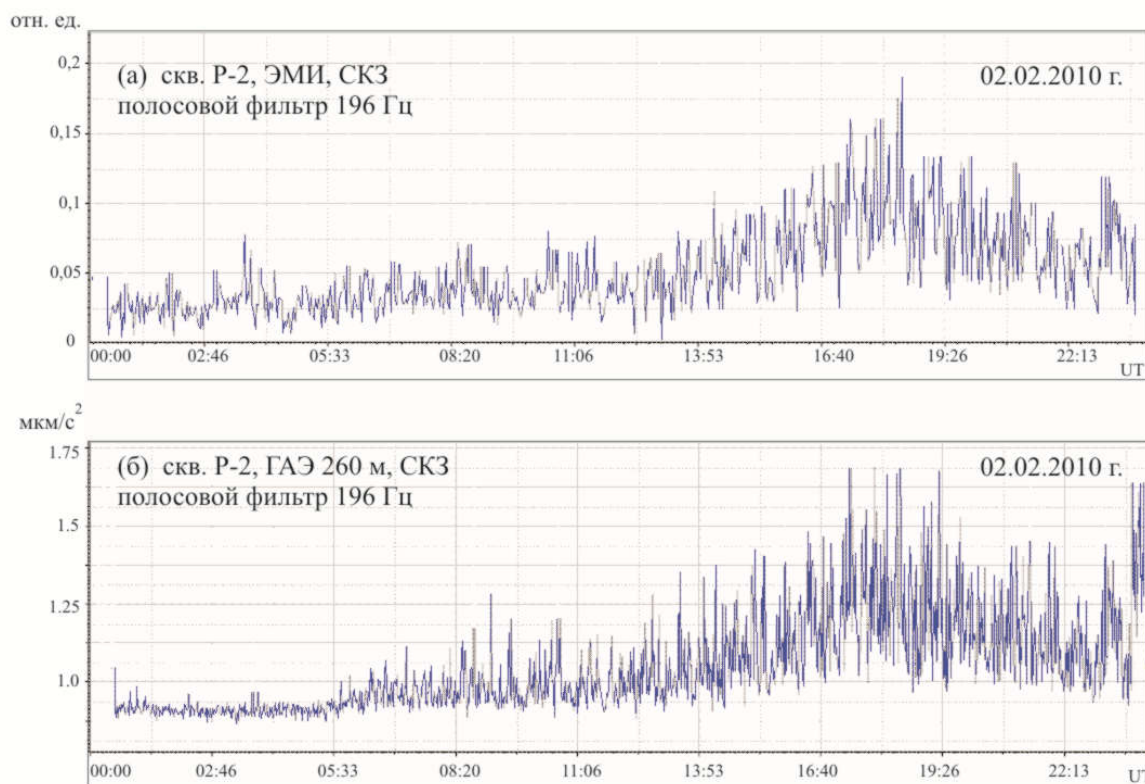
Данные, представленные на рисунке 5, иллюстрируют спектр ЕЭМИ, характерный для скважины Р-2 в светлое и темное времена суток, а также типичные суточные вариации ЕЭМИ.



**Рис. 5.** Спектры (а) и широкополосные суточные вариации ЭМИ (б), характерные для скважины Р-2 в различное время суток

Указанные данные получены по результатам широкополосных измерений с подземной электрической антенной типа «монополь» (см. главу 2).

**Результаты одновременных электромагнитных и геоакустических измерений в скважине Р-2.** Пример результатов одновременных электромагнитных и геоакустических измерений в скважине Р-2, полученных при установке геофона на глубине 260 м, приведен на рисунке 6. Данные были получены путем цифровой полосовой фильтрации исходных широкополосных сигналов ЭМИ и ГАЭ фильтрами с центральной частотой 196 Гц с последующим выделением СКЗ сигналов с осреднением на интервале 5 с. Коэффициент корреляции между рядами суточных вариаций ГАЭ и ЭМИ составил в этом случае величину  $\rho \approx 0.8$ . Таким образом, по результатам измерений на скважине Р-2, также, как и при измерениях на скважине Г-1, были выявлены суточные вариации ГАЭ, которые могут быть интерпретированы как отклики на

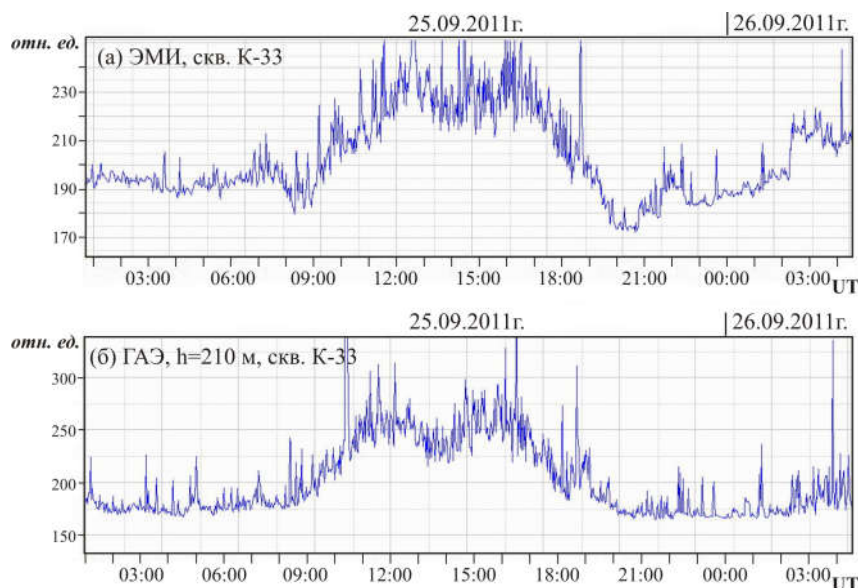


**Рис. 6.** Пример суточных вариаций ЕЭМИ (а) и ГАЭ (б) по результатам измерений на скважине Р-2 на глубине 260 м. Время UT (-12 ч по сравнению с местным временем). (Согласно [Гаврилов, Богомолов, Закупин, 2011])

суточные вариации амплитуды напряженности внешнего ЕЭМИ, воздействующего на геосреду в зоне скважины.

**Раздел 3.2.3. Результаты измерений на базе скважины К-33.** Согласно результатам, полученным автором, электромагнитная обстановка в районе скважины К-33 определяется сочетанием естественного и техногенного электромагнитных излучений. Спектр ЭМИ для скважины К-33 разделяется на две составляющие: фоновую составляющую естественного происхождения, спектральная плотность которой незначительно меняется во всем рабочем частотном диапазоне, и составляющую техногенного происхождения с дискретными компонентами высокой амплитуды. Электромагнитное излучение техногенного происхождения для скважины К-33 в полосе до 350 Гц (компонента 50 Гц и ее гармоники) связано с ЛЭП 110 кВ, расположенной в 300 м от скважины. Регистрация данных геоакустических и электромагнитных измерений на скважине К-33 производится в полосе частот  $700 \pm 50$  Гц. Выбор указанного участка спектра был обусловлен, прежде всего, стабильностью и достаточно высокой амплитудой суточных вариаций ЭМИ в этом диапазоне частот. Отметим, что суточные вариации уровня ЭМИ в диапазоне 700 Гц в значительной степени связаны с источниками естественного происхождения. На рисунке 7 приводятся графики суточных вариаций уровней

ЭМИ и ГАЭ, характерные для скважины К-33 в полосе частот  $700 \pm 50$  Гц. Из данных, представленных на рисунке 7, следует, что суточные вариации ГАЭ в диапазоне 700 Гц связаны с вариациями ЭМИ естественного происхождения.



**Рис. 7.** Графики суточных вариаций уровней ЭМИ (а) и ГАЭ (б) в полосе частот  $700 \pm 50$  Гц, характерные для скважины К-33  $\pm 50$  Гц. Время UT (-12 ч по сравнению с местным временем). (Согласно [Gavrilov et al., 2013])

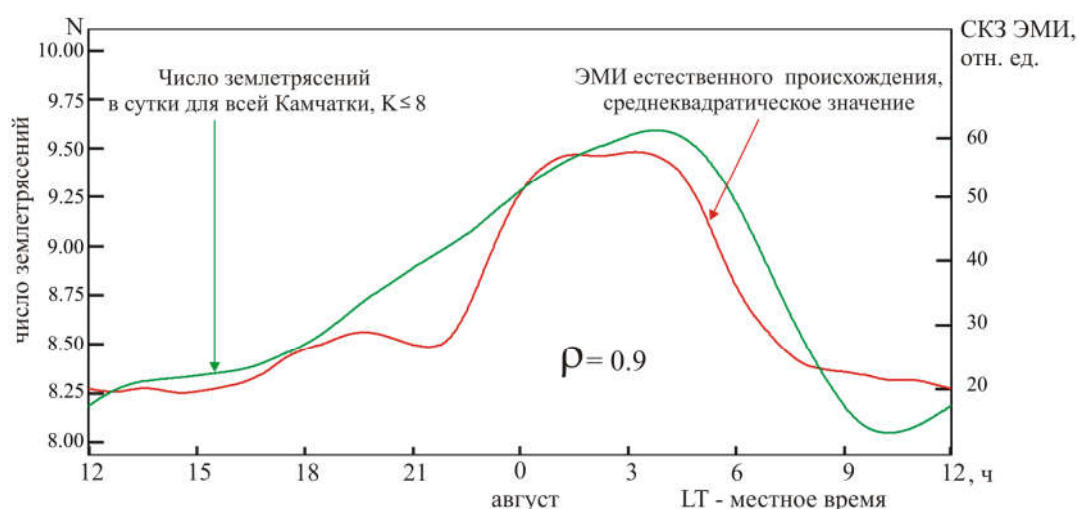
Приводимые данные синхронных электромагнитных и геоакустических измерений на скважине К-33, подтверждают выводы, сделанные по результатам измерений на скважинах Г-1 и Р-2, указывающие на коррелированность вариаций среднеквадратических значений ЭМИ и ГАЭ на асейсмичных интервалах. Можно отметить, что аналогичные результаты были получены также и по данным измерений на скважине Е-1.

**В разделе 3.2.4** обсуждаются результаты лабораторных экспериментов на образцах горных пород по изучению акустоэмиссионных откликов на электромагнитное воздействие, значительный объем которых был проведен сотрудниками Научной станции РАН в г. Бишкеке Л.М. Богомоловым, А.С. Закупиным, П.В. Ильичевым, В.А. Мубассаровой. По инициативе и с участием автора ряд лабораторных экспериментов указанного направления был проведен И.А. Пантелеевым с образцами пород, преобладающих на глубине установки основного геофона в скважине Г-1 (около 1000 м). Сопоставление результатов таких экспериментов с данными натурных геоакустических и электромагнитных измерений на качественном уровне говорит в пользу гипотезы о модулирующем воздействии ЭМИ на уровень ГАЭ для реальной геосреды. По результатам экспериментов делается вывод, что пороговая величина электромагнитного воздействия, при которой наблюдается акустоэмиссионный отклик, определяется наличием пьезоэлектрических фракций и макронеоднородностей, степенью влагонасыщенности, относительным уровнем механической нагрузки и параметрами электромагнитного воздействия

на образец. В частности, искусственное водонасыщение образцов позволяло снизить пороговое значения электромагнитного воздействия более чем в два раза.

**В разделе 3.2.5** диссертации приводятся основные результаты, полученные при участии автора в 2008 – 2010 гг. на Бишкекском геодинимическом полигоне в ходе специальных натурных экспериментов, в рамках которых осуществлялась регистрация откликов ГАЭ на воздействие электрических импульсов, вырабатываемых электрогенераторной установкой ЭРГУ-600-2. Полученные при проведении экспериментов результаты показали, что отклики геоакустической эмиссии на электромагнитное воздействие в случае размещения геофонов в скважинах могут надежно регистрироваться уже при уровне напряженности воздействующего электрического поля порядка 0.5 мВ/м, что по порядку величины совпадает с результатами скважинных измерений на Петропавловск–Камчатском геодинимическом полигоне.

**В разделе 3.3** приводятся результаты исследований, проведенных автором совместно с В.И. Журавлевым и Ю.В. Морозовой, указывающих на связь эффекта суточной периодичности слабых землетрясений с вариациями естественного электромагнитного СНЧ излучения (Рис. 8).



**Рис. 8.** Сравнение графика суточных вариаций числа слабых землетрясений класса  $K \leq 8.0$  с графиком суточных вариаций среднеквадратических значений ЭМИ естественного происхождения. (Согласно [Гаврилов и др., 2015])

По результатам многочисленных исследований (работы С. Davison, С.Г. Knott, А. Schuster, Иванова-Холодного, О.Д. Зотова и многих других авторов) установлено, что число землетрясений, происходящих в ночное время, примерно на 17% превышает число землетрясений, регистрируемых в дневное время. До последнего времени физические причины, обуславливающие наличие указанного эффекта, считались неустановленными. В диссертации показывается, что суточные вариации числа слабых землетрясений могут быть следствием суточных вариаций амплитуды напряженности естественного электрического поля СНЧ диапазона частот. Результаты исследований, представленные в главе 3, позволяют сделать два

основных вывода. Во-первых, установлено, что физические причины исследовавшихся вариаций ГАЭ связаны с модулирующим влиянием на интенсивность эндогенных геоакустических процессов внешних переменных электромагнитных полей СНЧ диапазона, воздействующих на геосреду в зонах соответствующих скважин. Во-вторых, результаты проведенных исследований указывают на связь амплитуд откликов ГАЭ на внешнее электромагнитное воздействие с напряженно–деформированным состоянием геосреды.

Основные результаты Главы 3 опубликованы в статьях [3, 6, 9, 10, 11, 12, 15, 16, 17, 21, 22, 25].

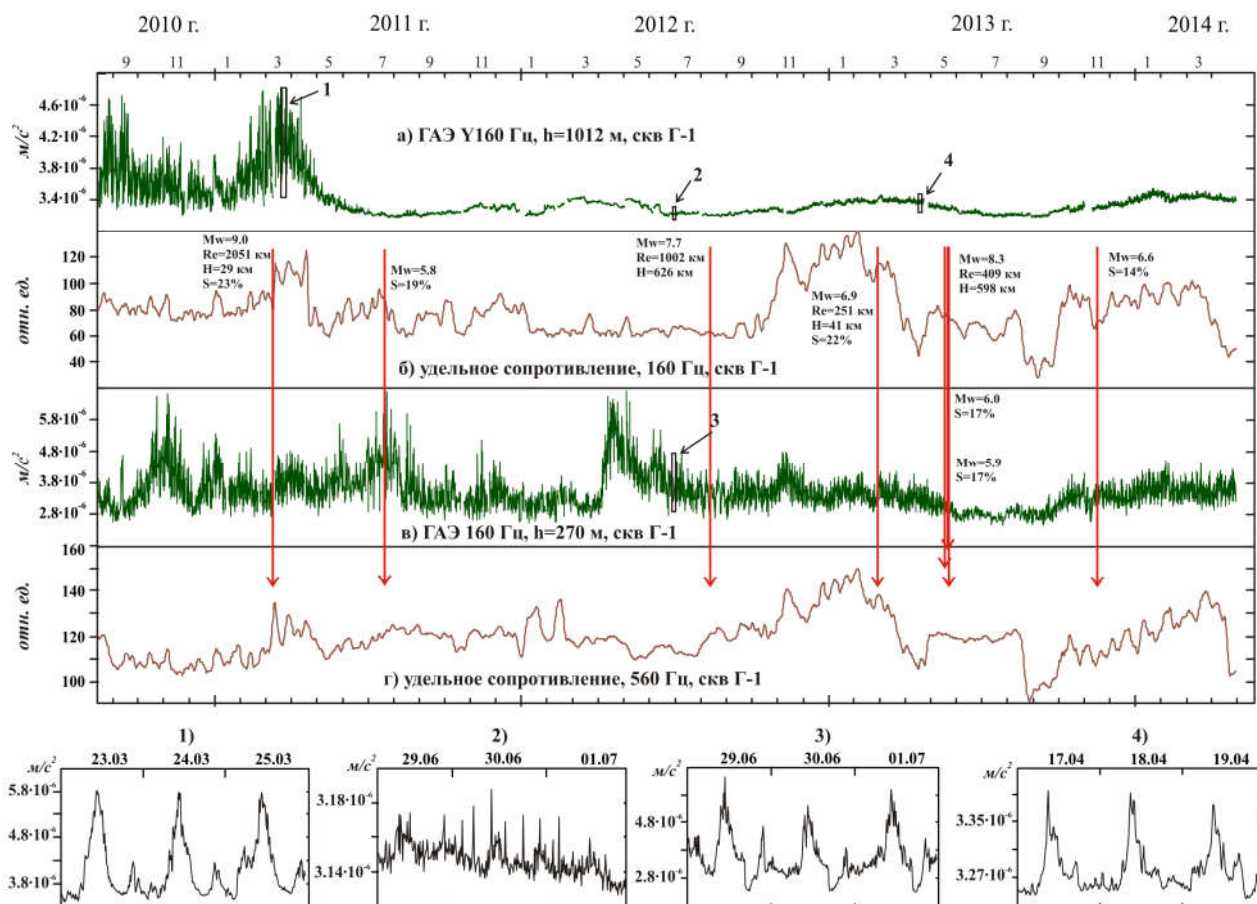
#### **Глава 4. Исследование физических механизмов влияния переменных электрических полей на интенсивность геоакустической эмиссии**

В рамках данной главы исследуются и обсуждаются возможные механизмы модуляции интенсивности ГАЭ внешним электромагнитным излучением, а также механизмы влияния напряженно–деформированного состояния геосреды на амплитуды откликов ГАЭ на внешнее электромагнитное воздействие. (Далее для упрощения изложения термин «отклики ГАЭ» будет использоваться, в основном, без фразы «на внешнее электромагнитное воздействие»). Учитывая сложность структур горных пород и процессов, протекающих в нелинейной энергонасыщенной геосреде, главный акцент в исследованиях делался на анализе многолетних временных рядов данных сети комплексных скважинных геофизических измерений Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона. Полученные *in situ* результаты при этом становились *отправной точкой* для дальнейших теоретических исследований.

**Раздел 4.1. Оценка возможного влияния на амплитуды откликов ГАЭ пьезоэлектрических свойств пород.** Наличие в породах скважины Г-1, относящихся к глубинам установки геофонов, достаточно большого содержания кварца вызвало необходимость оценки возможного влияния этого фактора на амплитуды откликов ГАЭ. На основе результатов натурных измерений и данных лабораторных экспериментов с образцами горных пород, показывается, что наличие у пород пьезоэлектрических фракций не способно ощутимо влиять на амплитуды откликов ГАЭ и быть основой механизма модуляции интенсивности ГАЭ внешним переменным электрическим полем. Также наличием у пород пьезоэлектрических фракций невозможно объяснить факты значительных *изменений* амплитуд откликов ГАЭ на внешнее переменное ЭМИ при с изменениях напряженно–деформированного состояния геосреды.

**Раздел 4.2. Влияние влагонасыщенности геосреды на амплитуды откликов ГАЭ.** В рамках данного раздела оценивается степень возможного влияния влагонасыщенности геосреды на процессы, обуславливающие модуляцию интенсивности ГАЭ внешним электромагнитным

излучением. При рассмотрении этого вопроса использовались данные одновременных геоакустических измерений однотипными геофонами, установленными в скважине Г-1 на глубинах 1012 м и 270 м, и данные измерений, полученные при измерениях с подземной электрической антенной в зоне скважины Г-1 по частотным каналам 160 Гц и 560 Гц (Рис. 9).



**Рис. 9.** Результаты одновременных геоакустических измерений в скважине Г-1 на разных глубинах: (а) - СКЗ ГАЭ для глубины 1012 м (Y-компонента, канал 160 Гц); (б) - изменения удельного сопротивления пород в зоне скважины Г-1 по данным канала 160 Гц; (в) - значения ГАЭ для глубины 270 м (Z-компонента, канал 160 Гц); (г) - изменения удельного сопротивления пород в зоне скважины Г-1 по данным канала 560 Гц; 1) – отклики ГАЭ для глубины 1012 м на интервале 23 - 25 марта 2011 г.; 2) – отклики ГАЭ для глубины 1012 м на интервале 29 июня - 1 июля 2012 г.; 3) – отклики ГАЭ для глубины 270 м на интервале 29 июня - 1 июля 2012 г.; 4) – отклики ГАЭ для глубины 1012 м на интервале 17 - 19 апреля 2013 г.

Как можно видеть на рисунке 9, данные, полученные при геоакустических измерениях в одной скважине, но в разных по глубине зонах, значительно различаются. В диссертации поясняется, что согласно данным геофизических исследований (главы 2, 4) в интервале глубин 589-734 м скважина Г-1 пересекает внедрения диоритов раннеплейстоценового возраста, представляющих периферийные зоны экструзивного массива сопки Мишенной. Интервал внедрения диоритов характеризуется высокими значениями удельного сопротивления пород, что соответствует низким значениям коэффициента фильтрации пород на этом интервале.

Таким образом, фактически внедрение диоритов разделяет околоскважинное пространство по глубине на «верхнюю» и «нижнюю» зоны, гидравлическая связь между которыми затруднена.

По результатам многолетних измерений показано (см. главу 2), что геофон, установленный в скважине Г-1 на глубине 270 м, контролирует геоакустические процессы, происходящие в «верхней зоне» в интервале глубин примерно до 570 м, а геофон на глубине 1012 м контролирует «нижнюю» зону в диапазоне глубин примерно от 700 м до 1300 м.

Принципиально разный характер геоакустических процессов в «верхней» и «нижней» зонах в первую очередь проявился во временной окрестности  $\pm 2.5$  месяца от момента Тохокского мегаземлетрясения ( $M_w=9.0$ , 11.03.2011 г., Япония). На указанном временном интервале амплитуды откликов ГАЭ для «верхней» зоны изменялись незначительно (см. Рис. 9в), а по результатам измерений в «нижней» зоне имела место значительная бухтообразная аномалия откликов ГАЭ (см. Рис. 9а). Также для «верхней» зоны скважины Г-1 не проявился и постсейсмический эффект деградации амплитуды откликов ГАЭ, в то время как по данным измерений на глубине 1012 м постсейсмический эффект был аномальным не только по амплитудам откликов ГАЭ, но и по своей продолжительности (годы). Проведенный в разделе 4.2 анализ возможных причин такой ситуации приводит к следующим выводам.

1. Как показано в ряде публикаций автора, характер комплекса данных скважинных измерений на интервале после момента Тохокского мегаземлетрясения и до конца августа 2012г. соответствует стадии роста сжимающих напряжений, а интервал сентябрь 2012 г. – декабрь 2014 г. соответствует стадии растяжения геосреды в зоне Петропавловск–Камчатского геодинамического полигона (см. главу 5). Следствием роста сжимающих напряжений в первые месяцы после Тохокского мегаземлетрясения явилось интенсивное выжимание жидкого флюида из порово–трещинного пространства геосреды «нижней» зоны, что послужило причиной практически полной деградации откликов ГАЭ к июлю 2011 г. для всех компонент сигнала ГАЭ.

2. Для «верхней» зоны в районе скважины Г-1 (глубины примерно до 570 м) изменения влагонасыщенности геосреды на том же временном интервале были незначительны. На это указывают результаты электромагнитных измерений по каналу 560 Гц (см. Рис. 9г) показывающие, что до сентября 2012 г. удельное сопротивление пород прискважинной зоны до глубин порядка 400 м менялось лишь в пределах 20%. Как можно видеть на рисунке 9в, амплитуды откликов ГАЭ для верхней зоны при этом также изменялись незначительно и в целом сохраняли достаточно высокие значения (см. врезку 3 для рисунка 9в).

3. Приводимые на рисунке 9 данные указывают на значительно более высокую чувствительность откликов ГАЭ для геосреды «нижней» зоны к изменениям напряженно–деформированного состояния в сравнении с чувствительностью для «верхней» зоны. При этом,

как показывают данные электромагнитных измерений (см. Рис. 9б, 9г), на всем временном интервале (сентябрь 2010 г. – апрель 2014 г.) изменения амплитуд откликов ГАЭ для обеих зон были связаны с изменениями влагонасыщенности геосреды в зонах.

4. Сравнение врезок (1) и (2) к рисунку 9 показывает, что амплитуды откликов ГАЭ для «нижней» зоны скважины Г-1 изменялись в значительных пределах, что связывается с существенными изменениями влагонасыщенности геосреды в этой зоне. На связь амплитуд откликов ГАЭ со степенью влагонасыщенности геосреды также указывают результаты одновременных измерений в нижней и верхней зонах в конце июня 2012 г. (соответственно врезки (2) и (3) к Рис. 9). Таким образом, приводимые данные показывают, что *влагонасыщенность геосреды является одним из главных факторов, влияющих на амплитуду откликов ГАЭ на внешнее электромагнитное воздействие.*

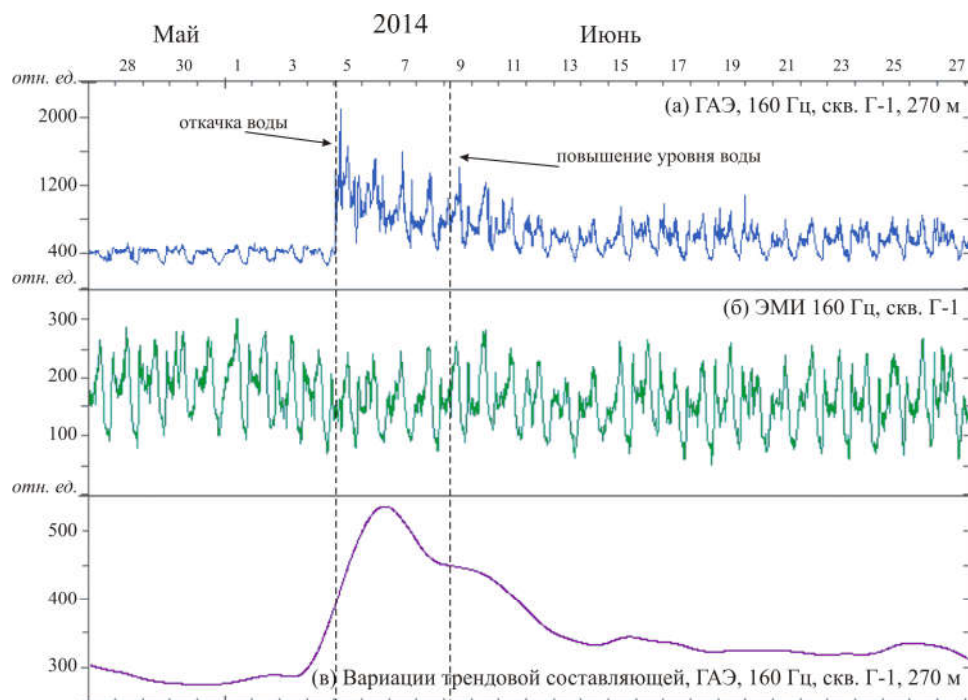
#### ***Раздел 4.2.3. Результаты натурного эксперимента на скважине Г-1 в 2014 г.***

Подтверждением вывода о зависимости амплитуд откликов ГАЭ от степени влагонасыщенности пород являются результаты натурного эксперимента с откачкой небольшого объема воды из скважины, проведенного на скважине Г-1 в июне 2014 г. Подобные эксперименты широко используются в практике опытных гидрогеологических опробований при определении фильтрационных параметров водоносных пластов. Откачка воды из скважины приводит к изменениям порового давления во влагонасыщенном порово-трещинном пространстве прискважинной зоны, что вызывает приток жидкости к скважине из смежного пространства. В этом случае подтверждением вывода о связи амплитуд откликов ГАЭ от степени влагонасыщенности геосреды должен быть рост амплитуд откликов ГАЭ при откачке воды из скважины.

В ходе эксперимента 4 июня 2014 г. из скважины Г-1 была проведена откачка около 50 л воды. Через пять дней уровень воды скважины был искусственно незначительно повышен. Геоакустические измерения проводились одновременно двумя однотипными геофонами, установленными на глубинах 270 м и 1012 м. Для контроля уровня воздействующего электромагнитного излучения использовались данные электромагнитных измерений с подземной электрической антенной.

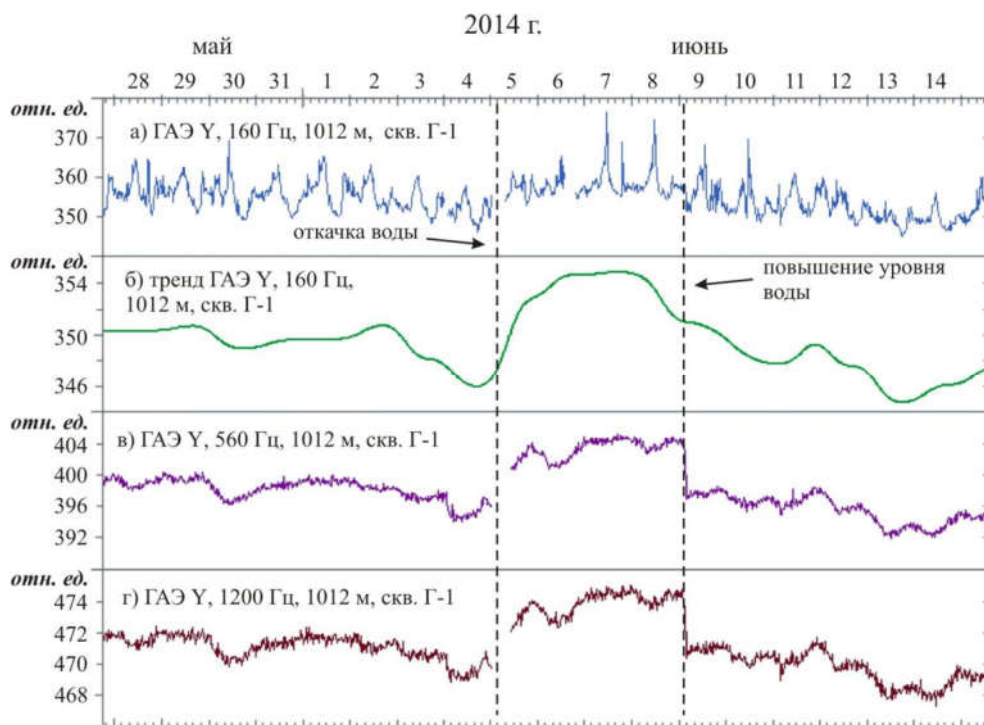
Из данных, приводимых на рисунке 10, видно, что в начальный момент после откачки воды СКЗ суточных вариаций ГАЭ на глубине 270 м выросли примерно на 200%, а трендовая составляющая ряда ГАЭ для глубины 270 м выросла примерно на 100% в сравнении со средним уровнем за предыдущие 10 суток.

Для глубины 1012 м изменения в характере ГАЭ не были столь значительны: среднеквадратические значения суточных вариаций ГАЭ на глубине 1012 м выросли примерно



**Рис. 10.** Изменения характера ГАЭ на глубине 270 м в диапазоне  $160 \pm 20$  Гц в ходе натурального эксперимента на скважине Г-1 в июне 2014 года: (а) – исходный ряд ГАЭ; (б) – суточные вариации внешнего ЭМИ в диапазоне  $160 \pm 20$  Гц; (с) – изменения трендовой составляющей ряда ГАЭ. (Согласно [Gavrilov, Naumov, 2017])

на 30-40%, а максимальные изменения уровня трендовой составляющей не превысили 3% (Рис. 11). Рост амплитуд откликов ГАЭ в этом случае произошел с задержкой около двух суток.



**Рис. 11.** Изменения характера ГАЭ на глубине 1012 м в ходе натурального эксперимента на скважине Г-1 в июне 2014 года: (а) – исходный ряд ГАЭ  $Y_{160}$  Гц; (б) - трендовая составляющая ряда ГАЭ  $Y_{160}$  Гц; (в) – исходный ряд ГАЭ  $Y_{560}$  Гц; (г) - исходный ряд ГАЭ  $Y_{1200}$  Гц. (Согласно [Panteleev, Gavrilov, 2015])

Полученные в ходе эксперимента результаты позволяют сделать два основных вывода. Во-первых, показывается, что увеличение влагонасыщенности контролируемого геофоном порово-трещинного пространства вызывает рост откликов ГАЭ. Во-вторых, полученные при эксперименте результаты, указывают на то, что влагонасыщенность «верхней» зоны скважины Г-1 в начале июня 2014 г. была значительно выше влагонасыщенности «нижней» зоны скважины Г-1. Таким образом, результаты эксперимента полностью подтверждают выводы, сделанные по данным рисунка 9: *влагонасыщенность геосреды является одним из главных факторов, влияющих на амплитуду откликов ГАЭ.*

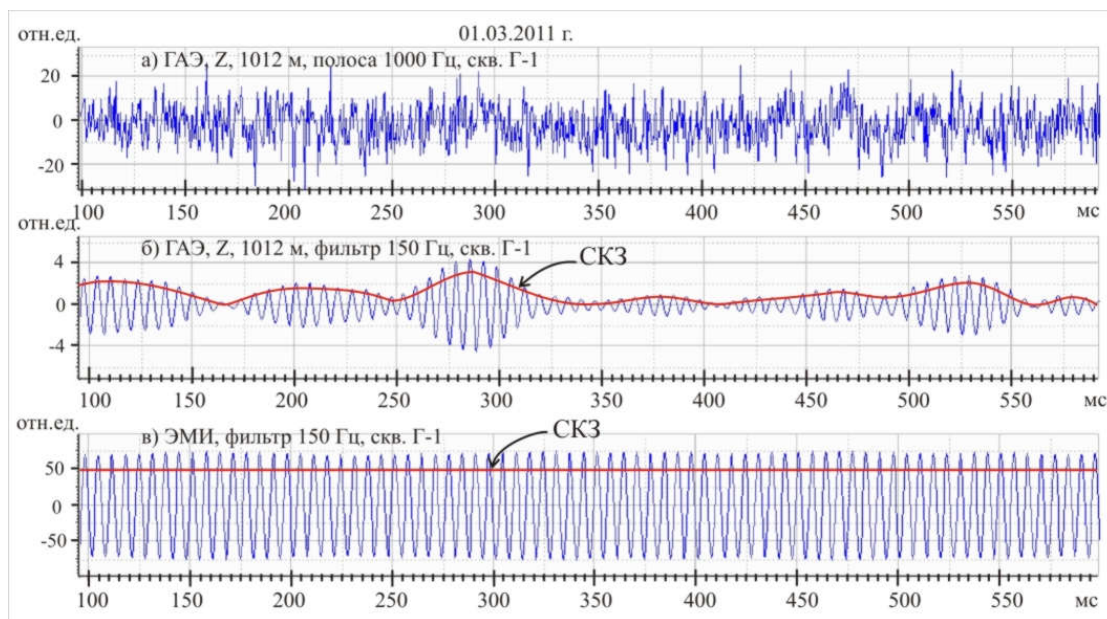
**Раздел 4.2.3.1. О физическом смысле трендовых составляющих рядов ГАЭ.** Анализ результатов, полученных в ходе натурного эксперимента в июне 2014 г. на скважине Г-1, а также данных многолетних скважинных измерений в режиме мониторинга, позволяет сделать вывод, что изменения трендовых составляющих рядов ГАЭ обусловлены шумами трения при движении жидкости в контролируемом геофоном порово-трещинном пространстве. Для правильного понимания физического смысла результатов, связанных с изменениями трендовых составляющих рядов ГАЭ, напомним (см. главу 2), что при геоакустических и электромагнитных измерениях сигналы на выходах геофонов и антенных устройств подвергаются обработке, в ходе которой осуществляется узкополосная полосовая фильтрация сигналов и выделение средневыпрямленных или среднеквадратических значений сигналов на выходах каждого из частотных каналов:

$$U_{\text{ср. в}}(t) = \frac{1}{T} \int_0^T |U_{\text{ф}}(t)| dt \quad \text{или} \quad U_{\text{скз}}(t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt}, \quad \text{где } T - \text{интервал осреднения.}$$

В итоге в дальнейшей обработке используются ряды средневыпрямленных или среднеквадратических значений ГАЭ.

На рисунке 12 приведены примеры коротких (500 мс) реализаций данных геоакустических и электромагнитных измерений, полученных при измерениях на базе скважины Г-1. На рисунках 12б и 12в, иллюстрирующих сигналы ГАЭ и ЭМИ на выходах фильтров, нанесены графики соответствующих среднеквадратических значений. В пределах каждой короткой реализации, например, на интервале 250-325 мс значения СКЗ отражают изменения амплитуд исходного ряда ГАЭ, т.е. являются трендовой составляющей ряда. Таким образом, изменения минимальных значений рядов среднеквадратических значений ГАЭ и ЭМИ отражают изменения трендов рядов исходных сигналов ГАЭ и ЭМИ, связанных с относительно медленными процессами, оказывающими влияние на параметры ГАЭ и ЭМИ. Как показывается в последующих разделах, такими процессами для ГАЭ и ЭМИ являются, в первую очередь, процессы фильтрации жидкого флюида в порово-трещинном пространстве геосреды. Для количественных оценок, связанных с процессами фильтрации, как правило, используется

скорость фильтрации жидкого флюида, под которой понимается величина:  $V = Q/\omega$ , где  $Q$  – суммарный расход жидкости для всего объема фильтрующей горной породы,  $\omega$  – все поперечное сечение фильтрующей горной породы.



**Рис. 12.** Пример коротких реализаций из данных одновременных измерений ГАЭ и ЭМИ, скважина Г-1: (а) - сигнал ГАЭ в полосе 1000 Гц; (б) - сигнал ГАЭ на частоте 150 Гц; (в) - сигнал ЭМИ на частоте 150 Гц. (Согласно [Gavrilov, 2014])

Результаты, полученные при эксперименте с откачкой воды в скважине Г-1, позволяют сделать вывод, что при *достаточной влагонасыщенности* геосреды изменения трендовых составляющих рядов ГАЭ с точностью до постоянных коэффициентов отражают изменения скорости фильтрации жидкости в контролируемой геофоном шумовой зоне. Спектры шумов, связанных с процессами фильтрации жидкостей и газов при малых скоростях, сосредоточены в низкочастотной части спектра (первые сотни герц). Согласно результатам лабораторных и натурных исследований амплитудно–частотные характеристики шумов в зоне конкретной скважины определяются структурой околоскважинного порово–трещинного пространства. В общем случае источниками гидродинамического шума являются неоднородности потоков жидкости в скважине и пласте при взаимодействии с поверхностью твердого тела или препятствиями. Как показано в разделе 4.4.1, значение средней *действительной* скорости фильтрационных потоков, возникающих в зоне скважины Г-1 под действием гравитационных сил, можно оценить величиной порядка  $4 \cdot 10^{-4}$  м/с. Таким образом, в рамках проводимых автором исследований можно считать, что скорость движения жидкого флюида в порово–трещинном пространстве геосреды  $v \ll c_s$ , где  $c_s$  – скорость звука в жидкости.

Подчеркнем, что даже при относительно небольшом радиусе шумовой зоны порядка первых сотен метров объем пород зоны будет составлять не менее  $10^7$  м<sup>3</sup>. В этом случае на

основании данных, приводимых К.С. Басниевым с коллегами, площадь трещинного пространства даже для плотных пород можно оценить величиной не менее  $10^8 \text{ м}^2$ . При такой большой площади порово-трещинного пространства шумовой зоны возникновения в ней достаточно значимых фильтрационных потоков должно сопровождаться возрастанием уровня ГАЭ за счет увеличения геоакустических шумов, связанных с трением жидкого флюида о борта пор и микротрещин. Как показано в диссертации, такое предположение подтверждается результатами многолетних комплексных скважинных измерений на Петропавловск–Камчатском геодинамическом полигоне.

**Раздел 4.3. Возможный механизм модулирующего электромагнитного влияния на интенсивность геоакустической эмиссии.** В разделе рассматривается возможный физический механизм, способный объяснить модулирующее влияние на интенсивность ГАЭ внешнего переменного электрического поля с частотами в диапазоне до первых единиц кГц.

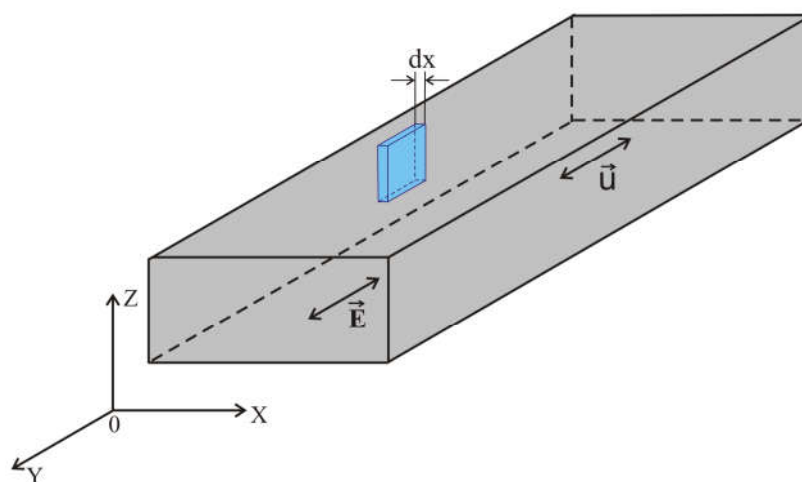
Приводимые выше результаты показывают, что наличие жидкой фазы в порах и трещинах пород является необходимым условием для влияния внешнего ЭМИ на интенсивность ГАЭ. Исходя из такого заключения, в разделе рассматривается возможный механизм модулирующего электромагнитного воздействия на интенсивность геоакустической эмиссии, связывая этот механизм с воздействием внешнего переменного электрического поля на поровую жидкость. Очевидно, что в этом случае рассматриваемая жидкость должна быть электрически *не нейтральна*. Известно, что слоем заряженной жидкости с некоторой объемной плотностью заряда является поровая жидкость в диффузном слое двойного электрического слоя (ДЭС), являющегося обязательным атрибутом процессов взаимодействия твердой и жидкой фаз на границе их раздела.

**В разделе 4.3.1.** дается описание двойного электрического слоя образующегося на границах раздела твердой и жидкой фаз горных пород. ДЭС – слой толщиной  $10^{-9} - 10^{-4} \text{ м}$ , образующийся на границе раздела двух фаз и состоящий из пространственно разделенных зарядов противоположного знака. ДЭС возникает во всех случаях, если хотя бы в одной из фаз имеются или возникают при взаимодействии свободные носители заряда. Исходной причиной возникновения ДЭС является неравенство химических потенциалов заряженных частиц в жидкой и твердой фазах. Ионы в жидкости могут взаимодействовать с твердой фазой как за счет электростатических сил (кулоновская адсорбция), так и за счет специфической (химической) адсорбции. Согласно современным представлениям о строении ДЭС, базирующимся на модели Гуи–Чепмена–Штерна, ДЭС состоит из слоя специфически адсорбированных ионов, относительно прочно связанных с поверхностью твердой фазы, и слоя ионов, электростатически притянутых к поверхности вместе с гидратными оболочками. Первые

образуют т. н. внутреннюю границу Гельмгольца, вторые – внешнюю границу Гельмгольца. Падение потенциала в пределах этих границ линейно, как в плоском конденсаторе. Далее следует диффузная часть ДЭС, состоящая из ионов обоих знаков, непрерывно распределенных в жидкой фазе. Ионы, компенсирующие заряд твердой фазы, концентрируются у поверхности (положительная кулоновская адсорбция), противоионы – обедняют приповерхностные слои (отрицательная кулоновская адсорбция). При достаточном удалении от поверхности потенциал диффузной части убывает почти экспоненциально. Поскольку главные минералы, слагающие горные породы, являются силикатами и алюмосиликатами, твердая фаза несет, как правило, отрицательный заряд, а жидкая – положительный. Диффузный слой в жидкости включает неподвижную и подвижную части, которые разделяются плоскостью скольжения. За пределами этой плоскости в диффузном слое становится возможным движение жидкости. Потенциал в плоскости скольжения, называемый электрокинетическим или  $\zeta$ -потенциалом, является основным параметром ДЭС, непосредственно связанным с электрокинетическими процессами. В качестве геометрической характеристики ДЭС используется эффективная толщина ДЭС – расстояние, отсчитанное от внешней границы Гельмгольца, на котором потенциал снижается в  $e$  раз от значения  $\varphi_\delta$ . Расчетные значения эффективной толщины ДЭС для жидкого раствора в зоне скважины Г-1 на глубине около 1000 м приводят к величине порядка 0.7 нм. С учетом толщины адсорбционного слоя ДЭС ( $\sim 0.3$  нм) общая толщина ДЭС в этом случае может оцениваться величиной 1.0 нм.

**Раздел 4.3.2. Возможный механизм модулирующего влияния внешнего ЭМИ звукового диапазона частот на интенсивность ГАЭ.** С учетом строения ДЭС в разделе рассматривается возможный физический механизм модулирующего влияния на интенсивность ГАЭ внешнего переменного электрического поля с частотами в диапазоне до первых единиц кГц. Жидкая фаза, находящаяся в порово-трещинном пространстве контролируемой геофоном шумовой зоны, при этом считается несжимаемой ньютоновской жидкостью, вязкость и диэлектрическая проницаемость которой за пределами плоскости скольжения ДЭС постоянны. Отметим, что на начальном этапе работ этого направления модулирующее воздействие слабых переменных электрических полей на интенсивность ГАЭ связывалось с изменениями сил вязкого трения между подвижной частью флюида и поверхностью твердой фазы. Рассматриваемая в рамках такой модели жидкость считалась вязкопластичной, обладающей сопротивлением сдвигу не только за счет вязкости, но и за счет статического трения (бингамовская жидкость). Такая модель соответствует случаю гранулированной геосреды с капиллярами *малого диаметра, размер которых сопоставим с толщиной ДЭС*. Между тем, полученные к настоящему времени результаты комплексных скважинных измерений, показывают, что для их интерпретации в большей степени подходит модель с микротрещинами,

диаметр которых значительно превышает толщину ДЭС. В таком случае, например, становится более понятной физическая суть результатов, указывающих на высокую коррелированность временных рядов ГАЭ с данным гидрогеохимического и гидрогеодинамического мониторинга (см. главу 5). В качестве упрощенной модели порово-трещинного пространства в зоне скважины на мезомасштабном уровне примем гетерогенную систему с двойной пористостью, состоящую из слабопроницаемых блоков и гранул, расчлененных более проницаемыми широкими (в сравнении с толщиной ДЭС) каналами. Рассмотрим отдельный проницаемый канал (Рис. 13). Будем считать канал широким в сравнении с толщиной ДЭС, что позволяет не учитывать влияние противоположной стенки канала на движение жидкой фазы.



**Рис. 13.** Упрощенная модель проницаемого канала:  $\vec{E}$  - напряженность электрического поля,  $\vec{U}$  - скорость течения поровой жидкости,  $dx$  - толщина выделенного объема жидкости с единичными площадями больших граней

Как уже отмечалось выше, в диффузном слое ДЭС поровая жидкость в горных породах электрически не нейтральна, т. е. внешнюю часть ДЭС можно считать слоем заряженной жидкости с некоторой объемной плотностью заряда. В этом случае при наличии в геосреде внешнего электрического поля на каждый произвольный элемент поровой жидкости объемом  $dV$  будет действовать сила  $d\vec{F} = \vec{E}\rho(x)dV$ , где  $\vec{E}$  - напряженность электрического поля;  $\rho(x)$  - объемная плотность заряда для рассматриваемого элемента объема. Будем считать, что электрическое поле, действующее на поровую жидкость, представляет собой плоскую электромагнитную волну, распространяющуюся по нормали к стенке канала, т.е. параллельно оси  $X$ . Рассмотрим соотношения, позволяющие установить зависимости скорости движения поровой жидкости от характеристик внешнего ЭМИ. Воспользуемся для этой цели известным подходом<sup>3</sup>.

<sup>3</sup>Справочник химика и технолога. Электродные процессы. Химическая кинетика и диффузия. Коллоидная химия / под ред. С.А. Симановой. - СПб.: АНО НПО «Профессионал». - 2004. - 838 с.

Пусть рассматриваемый объем жидкости расположен вблизи левой стенки канала (см. Рис. 13) в диффузном слое ДЭС за пределами плоскости скольжения, где возможно движение жидкости. Рассмотрим для простоты одномерную задачу, когда этот объем имеет бесконечно малую толщину  $dx$  и единичные площади больших граней. Объемная плотность заряда  $\rho(x)$  для рассматриваемого элемента объема в этом случае будет функцией от координаты  $x$  и определяется одномерным уравнением Пуассона:

$$\frac{d^2 \varphi(x)}{dx^2} = - \frac{\rho(x)}{\varepsilon_0 \varepsilon}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость поровой жидкости;  $\varphi(x)$  – электрический потенциал в точке  $x$ .

При учете того, что для выделенного объема  $dV = dx$ , уравнение Навье–Стокса, описывающее движение жидкости в канале, в этом случае сводится к равенству:

$$d\tau(x) + E\rho(x)dx = 0, \quad (2)$$

где  $d\tau(x)$  – разность сил трения на дальней (в соответствии с величиной  $x$ , см. рисунок 13) и ближней гранями слоя  $dx$ .

Совмещая уравнения (1) и (2) и интегрируя в пределах от  $x$  до  $\infty$ , а также учитывая, что  $d\varphi/dx|_{\infty} = 0$ , получим:  $\tau(x) = -\varepsilon\varepsilon_0 E \int_x^{\infty} \frac{d^2 \varphi}{dx^2} dx = \varepsilon\varepsilon_0 E \frac{d\varphi}{dx} \Big|_x$ .

Согласно закону внутреннего трения Ньютона  $\tau(x) = \mu \frac{du}{dx} \Big|_x$ , где  $\mu$  – динамическая вязкость поровой жидкости,  $u$  – скорость течения поровой жидкости. Тогда:

$$\mu \frac{du}{dx} = \varepsilon\varepsilon_0 E \frac{d\varphi}{dx} \quad \text{или} \quad du = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E}{\mu} d\varphi.$$

Учитывая, что вязкость и диэлектрическая проницаемость поровой жидкости в данном случае считаются постоянными, последнее выражение легко интегрируется. При интегрировании учтем, что на плоскости скольжения скорость движения поровой жидкости будет нулевой, а потенциал  $\varphi$  равен  $\zeta$ -потенциалу. Интегрирование выражения приводит к уравнению Гельмгольца–Смолуховского:

$$\int_0^{u(x)} du = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E}{\mu} \int_{\zeta}^{\varphi(x)} d\varphi \quad \text{или} \quad u(x) = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E}{\mu} (\varphi(x) - \zeta). \quad (3)$$

Вдали от межфазной границы потенциал падает экспоненциально:

$$\varphi(x) = \varphi_\delta e^{-x/\lambda}.$$

Из выражения (3) следует, что при постоянных значениях вязкости и диэлектрической проницаемости поровой жидкости за пределами плоскости скольжения ДЭС, изменения

скорости течения для фиксированной координаты  $x$  будут определяться изменениями напряженности электрического поля.

При внешнем стационарном тангенциальном электрическом поле за пределами действия стационарного поля ДЭС (расстояние, вдвое–втрое превышающее эффективную толщину ДЭС) потенциал  $\varphi$  будет близок к нулю и скорость движения поровой жидкости будет принимать максимальное значение:

$$u = -\frac{\varepsilon\varepsilon_0 E}{\mu} \zeta.$$

Результаты, полученные в ходе многочисленных лабораторных и натурных исследований процессов фильтрации жидкостей и газов, показывают, что при малых скоростях движения жидкого флюида ( $v \ll c_s$ , где  $c_s$  – скорость звука в жидкости), амплитуды шумов фильтрации *пропорциональны скоростям* фильтрационных потоков (работы Е.Ф. Афанасьева, К.Л. Грдзеловой, Д.В. Пющева, С.А. Николаева, М.Н. Овчинникова, Е.А. Марфина и др.). Рассчитанные согласно (3) значения линейной скорости движения поровой жидкости вследствие воздействия переменного электрического поля с амплитудой напряженности 10 мВ/м составляют величины порядка  $10^{-9}$  м/с, а средняя действительная скорость фильтрационных потоков в зоне скважины Г-1, как было указано ранее, оценивается величиной порядка  $4 \cdot 10^{-4}$  м/с. При столь малых скоростях амплитуды геоакустической эмиссии, связанной с движением поровой жидкости при воздействии переменного электрического поля и с фильтрационными потоками, можно считать пропорциональными скорости движения жидкого флюида.

Для геофона, находящегося на некотором расстоянии от движущегося объема поровой жидкости, выражение для амплитуды регистрируемых при этом шумов, с учетом (3), можно представить в виде:

$$A(t)_{Г\Delta Э} = a \vec{E}(t), \text{ где } a = \frac{\varepsilon\varepsilon_0(\zeta - \varphi(x))}{\mu}. \quad (4)$$

При внешнем гармоническом электрическом поле  $E(t)_{\text{вн}} = E_m \sin \omega t$ , вектор напряженности которого направлен вдоль проницаемого канала, амплитуда шумов фильтрации согласно (4) будет возрастать на интервалах роста напряженности поля и снижаться на интервалах ее уменьшения.

**Раздел 4.4. Возможные причины и механизмы изменений характеристик ГАЭ во временных окрестностях землетрясений.** Эффект изменений амплитуд откликов ГАЭ на внешнее электромагнитное излучение, регистрируемый во временных окрестностях относительно сильных землетрясений, относится к наиболее интересным и важным в прикладном плане результатам, полученным в ходе многолетних комплексных скважинных

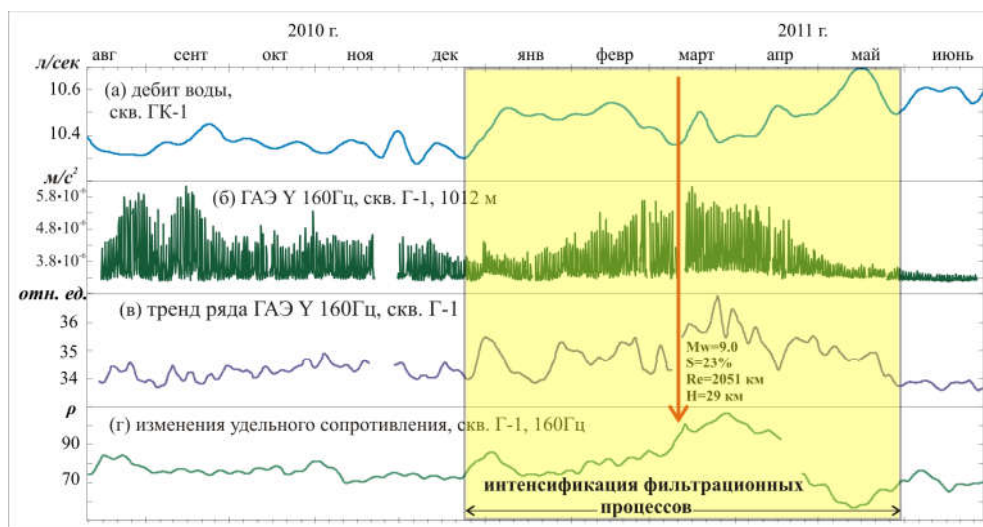
измерений на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне. Поясним, что термин «относительно сильных» применительно к землетрясениям подразумевает использование в качестве оценки значений величины  $S=L/R_h \cdot 100$ , %, где  $L=10^{0.44M-1.29}$  – длина очага землетрясения в км при аппроксимировании формы очага эллипсом;  $M$  – магнитуда события, вычисленная по сейсмическому моменту;  $R_h$  – гипоцентрального расстояние в км.

Землетрясения, для которых стабильно наблюдается указанный эффект, можно характеризовать величиной  $S \geq 5\%$ . В разделе оцениваются возможные физические причины и факторы, способные ощутимо влиять на амплитуды откликов ГАЭ во временных окрестностях относительно сильных землетрясений.

***Влияние изменений влагонасыщенности геосреды на характер данных геоакустических и электромагнитных измерений во временных окрестностях землетрясений.*** В разделе 4.3.2 показывается, что в масштабе контролируемой геофоном шумовой зоны интенсивность ГАЭ будет зависеть от суммарной площади поверхности пород, контактирующих с жидким флюидом и образующих ДЭС. Очевидно, что для геосреды сейсмоактивных регионов основные причины изменений указанного параметра могут быть связаны с изменениями напряженно-деформированного состояния геосреды, влекущих за собой изменения флюидонасыщенности и площади трещинного пространства. В соответствии с предложенным в разделе 4.2 возможным механизмом модулирующего влияния внешнего переменного электрического поля на интенсивность ГАЭ такие процессы должны сопровождаться изменением амплитуд откликов ГАЭ и изменениями удельного сопротивления пород в зоне измерительной скважины. Характер изменений амплитуд откликов ГАЭ при этом будет определяться характером фильтрационных процессов: в случае *притока* жидкого флюида в контролируемую геофоном шумовую зону амплитуды откликов ГАЭ будут возрастать, а в случае оттока флюида из шумовой зоны – уменьшаться.

В качестве примера, иллюстрирующего связь изменений характеристик ГАЭ с фильтрационными процессами, можно привести данные комплексных скважинных измерений, полученные во временной окрестности Тохокского мегаземлетрясения (Рис. 14). Приводимые данные показывают, что примерно за два с половиной месяца до момента Тохокского мегаземлетрясения начался рост трендовой составляющей ряда ГАЭ с одновременным появлением высокоамплитудных достаточно быстрых вариаций тренда. В соответствии с результатами натурного эксперимента на скважине Г-1 в июне 2014 г. подобные изменения в характере трендовой составляющей можно интерпретировать как следствие интенсификации фильтрационных процессов на глубинах около 1000 м в зоне скважины Г-1. Начало роста трендовой составляющей ряда ГАЭ совпадает с началом роста продолжительных значимых изменений *дебита скважины ГК-1* на интервале конец декабря 2010 г. - конец мая 2011 г.

Данные, приводимые на рисунке 14, позволяют сделать вывод, что изменения амплитуд и трендовой составляющей ряда ГАЭ на указанном интервале связаны с изменениями напряженно-деформированного состояния геосреды в зоне Петропавловск–Камчатского геодинамического полигона во временной окрестности Тохокского мегаземлетрясения.



**Рис. 14.** Изменения амплитуд откликов ГАЭ во временной окрестности Тохокского мегаземлетрясения в сопоставлении с данными гидрогеофизического и гидрохимического мониторинга: (а) – дебит воды скважины ГК-1; (б) – среднеквадратические значения ГАЭ для глубины 1012 м; (в) – изменения скорости фильтрации флюида в зоне скважины Г-1 для глубины 1012 м; (г) – изменения удельного сопротивления пород в зоне скважины Г-1 по данным канала 160 Гц

**Раздел 4.4.2. Влияние электрокинетических процессов на характеристики ГАЭ.** Основная цель данного раздела связана с оценками возможного влияния на характеристики ГАЭ электрокинетических процессов, связанных с фильтрационными потоками в порово-трещинном пространстве флюидонасыщенной геосреды. Приводятся примеры результатов скважинных измерений, для интерпретации которых необходимо учитывать возможное влияние электрокинетических процессов, в том числе, данные комплексных скважинных измерений во временной окрестности роя сильных землетрясений в Авачинском заливе в октябре 2002 г. При этом делается вывод о влиянии на изменения амплитуд откликов ГАЭ электрокинетических процессов, связанных с фильтрационными потоками в порово-трещинном пространстве шумовой зоны. Подтверждением этого вывода являются результаты численных расчетов эволюции электрокинетического тока при подготовке тектонического землетрясения. (Построение модели и расчеты значений плотности электрокинетического тока проводились сотрудником Института механики сплошных сред УрО РАН И.А. Пантелеевым).

Основные результаты Главы 4 опубликованы в статьях [3, 5, 7, 9, 13, 14, 16, 17, 18, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27].

## Глава 5. Применение результатов исследований для развития методов комплексного геофизического мониторинга напряженно–деформированного состояния геосреды

В главе обсуждаются прикладные аспекты результатов диссертационной работы. Учитывая, что Камчатка является одним из самых сейсмоактивных районов мира, применение результатов, полученных в ходе диссертационных исследований, в системах геофизического мониторинга напряженно–деформированного состояния геосреды и прогноза землетрясений с самого начала работ ставилась в числе основных задач.

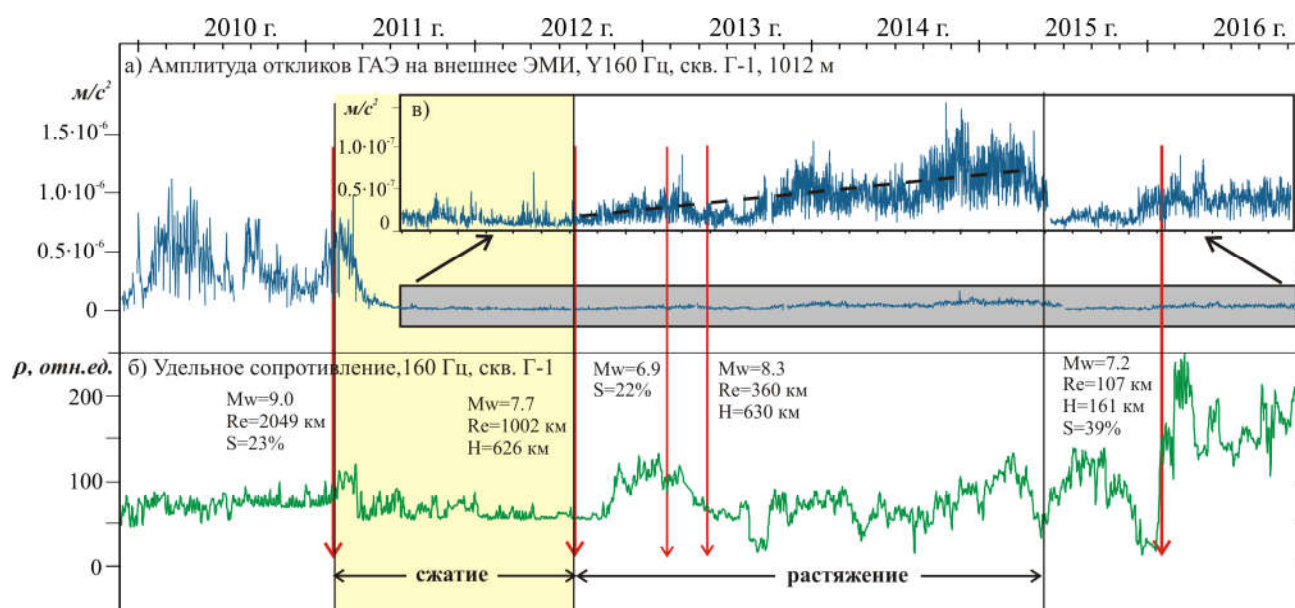
В рамках *раздела 5.1* анализируются результаты комплексных скважинных измерений на Петропавловск–Камчатском геодинамическом полигоне, которые можно разделить на два основных этапа. *Первый этап*: август 2000 г. – июль 2003 г., *второй этап*: сентябрь 2009 г. – апрель 2016 г. С конца июля 2003 г. до сентября 2009 г. геоакустические измерения в скважине Г-1 на глубине 1035 м были временно прекращены из-за неисправности геофона. Наиболее детально анализировались данные, полученные во временных окрестностях сильных ( $S=L_p/R_h \geq 9\%$ ) тектонических землетрясений.

По результатам измерений на *первом этапе* исследований отмечается следующее.

1. Согласованность результатов геоакустических измерений, проводившихся в скважине Г-1 на глубине 1035 м, с данными электромагнитных измерений с подземной электрической антенной, а также с данными других видов независимых измерений – минерализацией воды скважины Г-1, минерализацией и дебита воды скважины ГК-1.
2. Подтверждается, что на временных интервалах, на которых можно пренебречь электрокинетическими эффектами, амплитуды откликов ГАЭ на внешнее ЭМИ зависят, прежде всего, от степени влагонасыщенности пород прискважинной зоны.
3. На стадиях быстрых деформаций изменения огибающей амплитуд откликов ГАЭ согласуются с данными, отражающими изменения скорости фильтрации жидкого флюида в порово–трещинном пространстве шумовой зоны, что соответствует предложенному в главе 4 физическому механизму, объясняющему изменения огибающей амплитуд откликов ГАЭ влиянием электрокинетических процессов.

В *разделах 5.1.2* и *5.1.3* анализируются данные комплексных скважинных измерений, полученные во временной окрестности Тохокского мегаземлетрясения. Как показано в ряде работ автора, несмотря на большое (2049 км) эпицентральное расстояние, заключительная стадия подготовки Тохокского землетрясения, а также постсейсмическая стадия сопровождались значительными изменениями параметров геосреды в зонах измерительных скважин Петропавловск–Камчатского геодинамического полигона. Анализ данных геоакустических измерений, полученных для «шумовой» зоны скважины Г-1 на глубине около 1000 м, показывает, что, по крайней мере, с октября 2009 г. начались значительные изменения

параметров ГАЭ. В первую очередь, это относится к резкому уменьшению максимальных амплитуд откликов ГАЭ для всех пространственных компонент сигнала ГАЭ, начиная с декабря 2009 г. Во временной окрестности  $\pm 2.5$  месяца от Тохокского мегаземлетрясения изменения амплитуд откликов ГАЭ для компоненты Y имели характер «бухты» с максимумом, совпадающим с моментом землетрясения. Сразу после Тохокского мегаземлетрясения происходило интенсивное уменьшение амплитуд откликов ГАЭ в зоне скважины Г-1 для глубин более 700 м вплоть до их *полной деградации к июлю 2011 г.* (см. Рис. 9, 14). Анализ полученных данных показывает, что отправной точкой для *начала восстановления откликов ГАЭ* явился момент сильнейшего ( $M_w=7.7$ ) глубокого ( $H=626$  км) землетрясения с эпицентром в районе Охотского моря, произошедшего 14 августа 2012 г. на эпицентральной расстоянии около 1000 км от скважины Г-1. Из приводимых на рисунке 15 данных можно видеть, что начиная с августа 2012 г. характер ГАЭ для глубин порядка 1000 м в зоне скважины Г-1 принципиально изменился: началось постепенное восстановление откликов для Y-компоненты сигнала ГАЭ.



**Рис. 15.** Данные геоакустических и электромагнитных измерений в зоне скважины Г-1 во временной окрестности сильнейшего глубокого землетрясения 14.08. 2012 г. в районе Охотского моря: (а) - среднеквадратические значения ГАЭ для глубины 1012 м (Y-компонента, канал 160 Гц); (б) – изменения удельного сопротивления пород в зоне скважины Г-1 по данным канала 160 Гц. Рис. в) иллюстрирует изменения амплитуды откликов ГАЭ в более детальном масштабе

Анализ возможных физических причин постепенного роста откликов ГАЭ, проводимый в разделе 5.1.3, показывает, что сильнейшее глубокофокусное землетрясение, произошедшее 14.08.2012 г. в районе Охотского моря явилось **ключевым моментом**, после которого процесс роста сжимающих напряжений в зоне Петропавловск–Камчатского геодинамического полигона, начавшийся сразу после Тохокского мегаземлетрясения, сменился процессом

релаксации напряжений. Отражением процесса релаксации явились достаточно масштабные изменения параметров геосреды, в том числе, рост раскрытости микротрещин пород в зоне скважины Г-1. В этой связи тот факт, что с августа 2012 г. изменения амплитуд откликов ГАЭ, а также трендовых составляющих рядов ГАЭ для глубин 1012 м и 270 м, приобрели согласованный характер (см. Рис. 9), может объясняться возрастанием проницаемости геосреды в зоне скважины Г-1 для глубин от первых сотен до 1000 метров.

**Раздел 5.1.4. Сильнейшие сейсмические события 2013 - 2016 гг.: отражение в результатах комплексных скважинных измерений.** В 2012 - 2016 гг. в радиусе 1000 км от г. Петропавловска–Камчатского произошел ряд сильных и очень сильных сейсмических событий, среди которых, по мнению автора, можно выделить два землетрясения: сильнейшее ( $M=8.3$ ) глубокое Охотоморское землетрясение, произошедшее в мае 2013 г., и Жупановское землетрясение с магнитудой  $M_w=7.2$ , произошедшее 30 января 2016 г.

Сильнейшее глубокое Охотоморское землетрясение - самое сильное сейсмическое событие из зарегистрированных в районе Камчатки за все годы детальных сейсмологических наблюдений (с 1962 г. по настоящее время). Одновременно это землетрясение считается самым сильным в мире среди землетрясений сопоставимой глубины. Детальное рассмотрение результатов измерений во временных окрестностях **сильнейших камчатских сейсмических событий 2013 г.**, показывает, что интенсивные деформационные процессы, начавшиеся в конце августа 2012 г. после сильнейшего глубокого землетрясения в районе Охотского моря, наиболее ярко проявились в изменениях удельного электрического сопротивления геосреды в зоне скважины Г-1 (см. Рис. 9 и Рис. 15). Для наиболее значительной аномалии, имевшей место в сентябре 2012 г. – июне 2013 г., рост удельного электрического сопротивления геосреды в зоне скважины Г-1 для глубин порядка 1000 м составил около 600%. К указанной аномалии оказались приуроченными самые сильные камчатские сейсмические события 2012 - 2015 гг.: сильнейшее глубокое Охотоморское землетрясение, рой сильных землетрясений в мае 2013 г. в районе Авачинского залива, а также сильное ( $M_w=6.9$ ) Южно-Камчатское землетрясение, произошедшее 28 февраля 2013 г. у юго–восточного побережья Камчатки.

Жупановское землетрясение, произошло 30 января 2016 г. на эпицентральной расстоянии  $Re=107$  км от г. Петропавловска-Камчатского на глубине 161 км ( $R_h=193$  км). Магнитуда землетрясения составила  $M_w=7.2$  (данные USGS NEIC), величина параметра  $S=39\%$ . Эпицентр землетрясения располагался на суше примерно в 100 км на север от г. Петропавловска–Камчатского. По величине параметра  $S$  указанное землетрясение было самым сильным за все время скважинных геоакустических измерений на Петропавловск–Камчатском геодинамическом полигоне (с 2000 года). Землетрясение сопровождалось сотрясениями до шести баллов по шкале Меркалли.

Результаты измерений (см. Рис. 15) показывают, что с начала июня в зоне Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона начался процесс снижения влагонасыщенности геосреды, продолжавшийся до сентября 2015 года. Как отмечено в разделе 5.1.4, на это указывают как данные геоакустических и электромагнитных измерений на скважине Г-1, так и результаты измерений уровня воды скважины Р-2, расположенной в 20 км от скважины Г-1. По данным электромагнитных измерений (см. Рис. 15б), начиная с конца сентября 2015 г., отмечалось уменьшение удельного сопротивления в зоне скважины Г-1. Для канала электромагнитных измерений с центральной частотой фильтрации 160 Гц (глубина мониторинга около 1000 м) минимальные значения удельного сопротивления пород имели место примерно за 10 суток до землетрясения. За двое суток до Жупановского землетрясения по результатам электромагнитных измерений был зарегистрирован аномально быстрый и значительный рост удельного сопротивления пород в зоне скважины Г-1, означающий резкое увеличение скорости деформационных процессов в зоне Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона. Жупановское землетрясение было успешно предсказано автором совместно с научным сотрудником ИВиС ДВО РАН Ю.В. Морозовой.

**Раздел 5.2. Тенденции изменений регистрируемых величин на основных стадиях напряженно-деформированного состояния геосреды.** В разделе в виде пяти упрощенных схем представлены ключевые моменты и соответствующие тенденции изменений регистрируемых величин для основных стадий напряженно-деформированного состояния геосреды в районах измерительных скважин. В качестве примера на рисунке 16 приводится

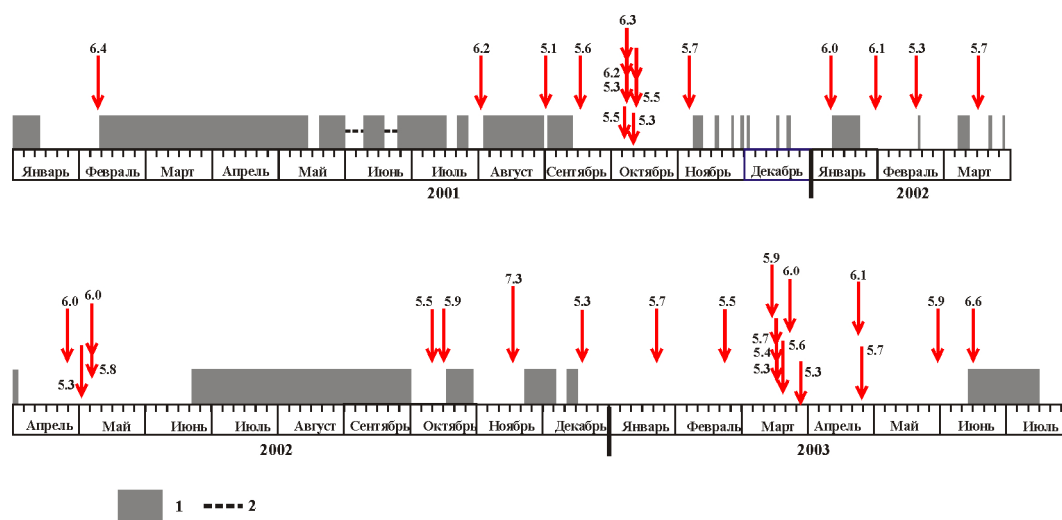


**Рис. 16.** Тенденции изменений регистрируемых величин при уменьшении всесторонних сжимающих напряжений в случае экстремально низкой влагонасыщенности геосреды

одна из таких схем. Приводимые схемы базируются на обсуждавшихся в главе 4 теоретических представлениях и результатах многолетних измерений на скважинах Петропавловск–Камчатского геодинамического полигона. Схемы носят обобщенный характер, хотя в определенной мере учитывают и особенности используемых скважин. Схемы разработаны для двух вариантов влагонасыщенности пород в зоне скважины – для влагонасыщенных и сухих пород. Схемы используются в практической работе при подготовке регулярных заключений о сейсмической опасности для Камчатского края.

**Раздел 5.3. О применении результатов проводимых исследований для прогноза землетрясений.** Прикладной аспект диссертационной работы автор видит, прежде всего, в возможности использования результатов, полученных в ходе проведенных исследований, для развития методов *геофизического мониторинга напряженно–деформированного состояния* геосреды сейсмоактивных регионов. При этом имеется в виду использование методов мониторинга напряженно–деформированного состояния геосреды, не являющихся собственно методами прогноза землетрясений, но используемых в системах среднесрочного и краткосрочного прогнозирования землетрясений для обеспечения необходимой информационной основы об изменениях напряженно–деформированного состояния региона. Учитывая, что Камчатка является одним из самых сейсмоактивных районов мира, автором ставилась задача оценки перспективности использования таких методов в системах прогноза землетрясений. В разделе с указанных позиций оценивается перспективность полученных результатов для использования в системах прогноза землетрясений. По мнению автора, результаты многолетних скважинных геоакустических и электромагнитных измерений на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне позволяют сделать вывод о перспективности использования методов, базирующихся на указанных видах измерений, для целей среднесрочного и краткосрочного прогноза землетрясений. Вместе с тем, как показывают результаты измерений, эффективность использования таких методов в значительной мере зависит от текущего состояния пород прискважинной зоны, прежде всего, от степени ее влагонасыщенности. Такой вывод можно сделать из сравнения данных геоакустических измерений, полученных на скважине Г-1 в 2010 – 2016 гг., с результатами, полученными на интервале 2001 – 2003 гг. На рисунке 17 указаны моменты землетрясений с  $M \geq 5.0$ , произошедшие за период с 1.01.2001 г. по 31.07.2003 г. в зоне радиусом  $R \leq 300$  км от скважины Г-1, а также моменты землетрясений с  $M \geq 5.5$ , произошедшие за тот же период в зоне радиусом  $R \leq 550$  км от скважины Г-1. Кроме этого указан момент самого сильного землетрясения, произошедшего в этот период (17.11.2002 г.,  $M_w=7.3$ , эпицентральное расстояние 1050 км). Как можно видеть из представленных данных, перед всеми указанными землетрясениями имела место деградация суточного хода ГАЭ. В отличие от ситуации в 2001 –

2003 г., изменения амплитуд откликов ГАЭ во временных окрестностях сильных землетрясений на интервале 2010 – 2015 гг. носили гораздо более сложный характер, что предположительно связано с влиянием Тохокского мегаземлетрясения.



**Рис. 17.** Нарушения суточного хода ГАЭ в сопоставлении с сейсмической активностью на интервале 2001 – 2003 гг.: 1- наличие суточного хода; 2 – пропуски данных. Красные стрелки - моменты землетрясений. (Согласно [Гаврилов, Морозова, Сторчеус, 2006])

*В разделе 5.3.1* приведены результаты пробных прогнозов землетрясений в реальном времени на этапе 2012 - 2016 гг. За этот период по данным комплексных скважинных измерений было сделано четыре официально зарегистрированных успешных прогноза сильных камчатских землетрясений, в том числе прогноз Южно-Камчатского землетрясения ( $M_w=6.9$ ,  $R_e=270$  км), произошедшего 28 февраля 2013 г., и прогноз Жупановского землетрясения ( $M_w=7.2$ ,  $R_e=107$  км,  $H=161$  км), произошедшего 30 января 2016 г. Однако, необходимо подчеркнуть, что полученные результаты нельзя расценивать как свидетельство разработки надежных методов прогноза землетрясений. В данном случае речь может идти лишь о разработке достаточно эффективных методов мониторинга напряженно-деформированного состояния геосреды, способных обеспечивать необходимую информационную основу для методов прогноза землетрясений. Разработка надежных методов среднесрочного и краткосрочного прогноза землетрясений является самостоятельной и значительно более сложной задачей.

Основные результаты Главы 5 опубликованы в статьях [16, 19, 21, 22].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Главным результатом проведенной работы является создание основы нового научного направления, связанного с исследованием модулирующего воздействия слабых электромагнитных СНЧ полей на интенсивность геоакустической эмиссии горных пород в условиях их естественного залегания. В рамках указанного направления исследований получены следующие наиболее важные результаты:

- установлено неизвестное ранее явление модулирующего воздействия слабых электромагнитных СНЧ полей на интенсивность геоакустической эмиссии горных пород в условиях их естественного залегания. Предложен и описан предполагаемый физический механизм указанного явления;
- показано, что изменения амплитуд окликов ГАЭ на воздействие слабых электромагнитных СНЧ полей связаны с изменениями напряженно-деформированного состояния геосреды в зоне измерений;
- установлено, что наиболее значимым фактором, влияющим на изменения амплитуд окликов ГАЭ на внешнее электромагнитное воздействие во временных окрестностях сильных землетрясений, является суммарная площадь соприкосновения жидкой и твердой фаз в порово-трещинном пространстве контролируемой геофоном шумовой зоны;
- показано, что в случаях, когда порово-трещинное пространство шумовой зоны геофона содержит значительное число капилляров переменного сечения, и при этом радиусы многих капилляров соизмеримы с толщиной двойных электрических слоев, значимое влияние на амплитуды откликов ГАЭ могут оказывать также электрокинетические процессы;
- установлено, что при достаточно высокой влагонасыщенности контролируемой геофоном шумовой зоны изменения трендовой составляющей рядов ГАЭ отражают изменения скорости фильтрации жидкого флюида. В случае экстремально низкой флюидонасыщенности пород изменения трендовой составляющей рядов ГАЭ связаны, в основном, с изменениями величин сил трения скольжения между гранулами пород и бортами существующих трещин;
- показано, что общепланетарный эффект суточной периодичности слабых землетрясений, выражающийся в возрастании числа слабых землетрясений в темное время суток, может быть обусловлен воздействием на геосреду естественного электромагнитного излучения СНЧ диапазона частот.

К числу наиболее важных следует отнести также результаты, относящиеся к развитию методической базы комплексного скважинного геофизического мониторинга. Среди них - разработка нового метода непрерывного мониторинга удельного сопротивления пород прискважинной зоны, где в качестве зондирующего сигнала используется непрерывное

электромагнитное излучение техногенного или природного происхождения, а в качестве датчиков – подземные электрические антенны.

Результаты многолетних исследований на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне указывают на большое *прикладное значение* работ, связанное с использованием результатов исследований для развития методов геофизического мониторинга напряженно-деформированного состояния геосреды сейсмоактивных регионов. С 2009 г. новые методы комплексного геофизического мониторинга напряженно-деформированного состояния геосреды, основу которых составляют геоакустические скважинные измерения и электромагнитные измерения с подземными антеннами, стали активно использоваться для подготовки регулярных заключений о сейсмической опасности для Камчатского края. Предполагается, что новые методы комплексного геофизического мониторинга напряженно-деформированного состояния геосреды, базирующиеся на геоакустических скважинных измерениях и электромагнитных измерениях с подземными антеннами, могут быть адаптированы для применения и на других геодинамических полигонах.

Касаясь прикладного аспекта исследований, следует особо подчеркнуть, что в ходе работ по теме диссертации на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне была создана уникальная непрерывно функционирующая территориально-распределенная радиотелеметрическая сеть комплексных скважинных измерений. Сеть непрерывно развивается, как за счет совершенствования технической и методической баз измерений, так и за счет увеличения числа скважинных измерительных пунктов. Наличие такой сети дает возможность проведения новых исследований, связанных с изучением эндогенных геоакустических и электромагнитных процессов, а также постановки и реализации проектов по ряду других актуальных направлений исследований.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в журналах, входящих в перечень ВАК

1. **Гаврилов В.А.**, Левченко Д.Г., Утяков Л.Л., Шехватов Б.В. Гидрохимическая донная станция для регистрации краткосрочных предвестников землетрясений// Океанология. - 2000. - Т. 40. - №3. - С.456-467.
2. **Гаврилов В.А.**, Власов Ю.А., Денисенко В.П., Морозова Ю.В., Яковлева Ю.Ю. Опыт комплексных скважинных геофизических наблюдений в целях мониторинга состояния геосреды // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. Изд-во КГУ. Петропавловск-Камчатский, 2006. - № 2. - Вып. 8. - С. 43-53.
3. **Гаврилов В.А.**, Морозова Ю.В., Сторчеус А.В. Вариации уровня геоакустической эмиссии в глубокой скважине Г-1 (Камчатка) и их связь с сейсмической активностью// Вулканология и сейсмология. - 2006. - № 1. - С.52-67.
4. Власов Ю.А., **Гаврилов В.А.**, Денисенко В.П., Федористов О.В.. Телеметрическая система сети комплексного геофизического мониторинга // Сейсмические приборы. М.: ОИФЗ РАН. - 2007. - Вып. 44. - № 2. - С.32-38.
5. **Гаврилов В.А.** Физические причины суточных вариаций уровня геоакустической эмиссии // ДАН. - 2007. - Т.414. - №3. - С.389-392.
6. **Гаврилов В.А.**, Журавлев В.И., Морозова Ю.В. О связи эффекта суточной периодичности слабых землетрясений с вариациями естественного электромагнитного СНЧ-излучения // ДАН. - 2010. - Т. 435. - № 4. - С. 535-540.
7. Дещеревский А.В., Мухин В.М., Сидорин А.Я., **Гаврилов В.А.**, Яковлева Ю.Ю. Опыт определения коэффициента таяния снега при расчетах водного баланса в почве на Камчатке и в Средней Азии // Геофизические исследования. - 2006. - Вып.6. - С.71-84.
8. Гуфельд И.Л., **Гаврилов В.А.**, Корольков А.В., Новоселов О.Н. Эндогенная активность земли и декомпрессионная модель сейсмического шума // ДАН. - 2008. - Т. 423. - № 6. - С. 811-814.
9. А.В. Дещеревский, В.М. Мухин, А.Я. Сидорин, **В.А. Гаврилов**, Ю.Ю. Яковлева. Выявление влияния гидрометеорологических факторов на данные геофизического мониторинга в условиях Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона// Вулканология и сейсмология. - 2008. - №4. - С.67-78.
10. Дьяконов Б.П., Мартышко П.С., Троянов А.К., **Гаврилов В.А.**, Астраханцев Ю.Г., Начапкин Н.И., Белоглазова Н.А. Временная изменчивость сейсмоакустической эмиссии на больших глубинах // ДАН. - 2010. - Т. 433. - № 2. - С. 244-247.
11. **Гаврилов В.А.**, Богомолов Л.М., Закупин А.С. Сравнение результатов скважинных геоакустических измерений с данными лабораторных и натуральных экспериментов по электромагнитному воздействию на горные породы // Физика Земли. - 2011. - №11. - С.63-74.
12. **Гаврилов В.А.**, Журавлев В.И., Морозова Ю.В. Закономерности проявления суточной периодичности слабых землетрясений на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2011. № 2. С. 60–75.
13. Троянов А.К., Дьяконов Б.П., Мартышко П.С., Астраханцев Ю.Г., Начапкин Н.И., **Гаврилов В.А.**, Белоглазова Н.А. Сейсмоакустическая эмиссия и электромагнитное излучение трещиноватых пород в скважинах// ДАН. - 2011. - Т. 436. - № 1. - С. 244-247.
14. **Гаврилов В.А.** О методе непрерывного мониторинга удельного электрического сопротивления горных пород// Сейсмические приборы. М.: ИФЗ РАН. - 2013. - Т.49. - №3. - С.25-38.
15. Полтавцева Е.В., Власов Ю.А., **Гаврилов В.А.** Исследование откликов на приливное воздействие в рядах скважинных геоакустических измерений // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. - 2013. - № 2. - Выпуск № 22. - С. 178-183.

16. **Гаврилов В.А.**, Пантелеев И.А., Рябинин Г. В. Физическая основа эффектов электромагнитного воздействия на интенсивность геоакустических процессов. *Физика Земли*. - 2014. - №1. - С.89-103.
17. **Гаврилов В.А.**, Полтавцева Е.В., Дещеревский А.В., Бусс Ю.Ю., Морозова Ю.В. Мониторинг состояния геосреды на основе синхронных геоакустических и электромагнитных скважинных измерений: использование естественного электромагнитного излучения // *Сейсмические приборы*. М.: ИФЗ РАН. - 2015. - Т.49. - №3. - С.25-38.
18. **Гаврилов В.А.** Механизм модуляции интенсивности геоакустической эмиссии слабыми электромагнитными полями звукового диапазона частот // *ДАН*. - 2016. - Т. 469. - № 2 - С. 224-229.
19. **Гаврилов В.А.**, Дещеревский А.В., Полтавцева Е.В., Сидорин А.Я. Технологии предварительной обработки данных комплексного геофизического мониторинга и опыт их применения в системе геоакустических наблюдений на Камчатке // *Сейсмические приборы*. - 2016. - Т.52. - № 4. - С. 57-75.
20. **Гаврилов В.А.**, Пантелеев И.А. Влияние фильтрационных процессов в горных породах на характеристики геоакустической эмиссии // *Геофизические исследования*. - 2016. - Т.17. - № 2. - С. 32-53.
21. **Gavrilov V.A.**, Panteleev I.A., Ryabinin G.V., Morozova Yu.V. Modulating impact of electromagnetic radiation on geoacoustic emission of rocks // *Russian journal of Earth sciences*. - 2013. - Vol. 13. - ES1002, DOI:10.2205/2013ES000527.
22. **Gavrilov V. A.** On the Mechanism of Variations in the Intensity of Geoacoustic Emission Caused under the Action of Audio-Frequency Electromagnetic Field//*Russian journal of Earth sciences*. - 2014. - Vol. 14. - No. 2. DOI: 10.2205/2014ES000541.
23. Panteleev I. A., **Gavrilov V. A.** Implications of electrokinetic processes for the intensity of geoacoustic emission in the time vicinity of a tectonic earthquake: A theoretical study // *Russian Journal of Earth Science*. 2015. Vol. 15. No. 4. – ES4003 DOI: 10.2205/2015ES000557.
24. **Gavrilov V. A.**, Naumov A. V. Modulation of geoacoustic emission intensity by time-varying electric field // *Russian Journal of Earth Sciences*. - 2017. - Vol.17. - No. 1. - DOI: 10.2205/2017ES000591.

**Статьи в зарубежных изданиях, включенных в систему цитирования Web of Science**

25. **V. Gavrilov**, L. Bogomolov, Yu. Morozova. and A. Storcheus. Variations in geoacoustic emissions in a deep borehole and its correlation with seismicity// *Annals of Geophysics*. - 2008. - Vol. 51. - No. 5/6. - pp.737-753.
26. G. V. Ryabinin, Yu. S. Polyakov, **V. A. Gavrilov** and S. F. Timashev. Identification of earthquake precursors in the hydrogeochemical and geoacoustic data for the Kamchatka peninsula by flicker-noise spectroscopy // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*- 2011. - No.11. - pp. 541-548.
27. G. V. Ryabinin, **V. A. Gavrilov**, Yu. S. Polyakov and S. F. Timashev. Cross-Correlation Earthquake Precursors in the Hydrogeochemical and Geoacoustic Signals for the Kamchatka Peninsula // *Acta Geophysica*. - 2012. - Vol. 60. - No. 3. - pp. 874-893.

Подписано в печать 22.02.2017 г.

Объем: 2,0 усл. печ. л.

Тираж 100 экз.

Отпечатано в ООО «ФОН»

683023, г. Петропавловск – Камчатский, бульвар Пийпа, 9

Тел. 8(4152) 490-337, 490-338