

ОТЗЫВ

официального оппонента Родкина Михаила Владимировича

на диссертацию Гаврилова Валерия Александровича

«Воздействие переменных электромагнитных полей на геоакустические процессы:

эмпирические закономерности и физические механизмы»,

представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.10 — геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

Рассматриваемая диссертационная работа носит комплексный характер и посвящена широкому кругу проблем, связанных с генерацией геоакустической эмиссии (ГАЭ) в геофизической среде (геосреде) и использованием результатов скважинных геоакустических измерений для мониторинга напряженно – деформированного состояния геосреды с выходом на оценку текущей сейсмической опасности. Диссертация включает широкий комплекс экспериментальных и теоретических разработок. Базовой основой для теоретических исследований являются данные, полученные автоматизированной сетью непрерывных комплексных скважинных геофизических измерений Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона, созданной по инициативе, под руководством и при непосредственном участии автора.

Актуальность темы работы сомнений не вызывает. Чрезвычайно актуально, как создание системы комплексных скважинных измерений, так и анализ, и интерпретация получаемых данных, разработка физических моделей соответствующих процессов, применение системы для мониторинга напряженно-деформированного состояния геосреды применительно к среднесрочному и оперативному прогнозу сильных близких землетрясений.

Содержание диссертации:

Полный объем диссертации составляет 385 страниц текста и включает в себя 132 рисунка, четыре таблицы, список литературы из 253 наименований и 4 приложения. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы.

Введение содержит обоснование актуальности, формулировку цели, задач и методов исследования. Показана научная новизна и практическая значимость, приведены выносимые на защиту положения, отражена апробация работы и личный вклад автора.

В **первой главе** обсуждаются характерные особенности геосреды сейсмоактивных регионов, источники ГАЭ и особенности скважинных геоакустических измерений.

Обсуждаются результаты натурных экспериментов с откачкой воды из скважины, а также результаты лабораторных и натурных экспериментов по возбуждению ГАЭ. Показывается устойчивость спектра ГАЭ при различном возбуждении, что указывает на зависимость этой характеристики в основном от структуры контролируемой геофоном шумовой зоны. При различных воздействиях меняется в основном только амплитуда ГАЭ. Даны примеры изменений амплитуды ГАЭ в окрестности землетрясений, причем некие изменения выделяются автором как до, так и во время, и после землетрясения. Отмечается эффект деградации суточного хода во временных окрестностях землетрясений.

Детально рассматриваются процессы, в той или иной степени оказывающие модулирующее воздействие на интенсивность геоакустической эмиссии. Заканчивается глава обсуждением результатов высокочувствительных скважинных широкополосных измерений ГАЭ.

Важнейшим представленным здесь результатом является вывод об определяющем модулирующем воздействии на ГАЭ не приливных процессов, а неких иных строго суточных воздействий; далее будет показано, что определяющую роль играют вариации амплитуды напряженности внешнего переменного электрического поля, воздействующего на геосреду в зоне скважины. Определяющая роль переменного электрического поля следует из сопоставления данных об изменениях параметров электромагнитного излучения (ЭМИ) в зоне скважины с изменениями параметров ГАЭ. Вывод подкрепляется спектральным анализом, показывающим, что доминирующим периодом в спектре ГАЭ является строго суточная компонента, отсутствующая среди основных приливных гармоник. Автор аргументирует, что основные источники ГАЭ связаны с процессами фильтрации жидкого флюида в порово-трещинном пространстве геосреды. Кроме этого ГАЭ горных пород в условиях естественного залегания связывается с процессами перепковки гранулированной структуры горной породы и сухого трения.

Автор отмечает, что полной ясности в механизмах порождения ГАЭ на настоящий момент нет. В качестве замечания и предложения на будущее можно отметить, что при анализе такого комплекса процессов мог бы оказаться весьма полезным аппарат линейной неравновесной термодинамики с использованием соотношений взаимности Онсагера.

Вторая глава – Методы, подходы и техническая база исследований влияния электромагнитных излучений на характеристики геоакустической эмиссии - посвящена, в

основном, обсуждению методических вопросов, а также вопросов создания и развития системы скважинного геофизического мониторинга в районе г.Петропавловска – Камчатского. Показываются преимущества скважинных измерений, обсуждаются вопросы, связанные с организацией комплексных скважинных измерений в различных условиях. Детально обсуждается техника и методика проведения геоакустических и геоэлектрических измерений с подземными антеннами. Описывается разработанная автором методика непрерывного мониторинга удельного электрического сопротивления прискважинной зоны при одновременном использовании подземной и наземной антенн, а также возможность реализации такого мониторинга на основе только подземной антенны (в условии априорной информации о режиме естественного электрического поля).

Подчеркнем, что работами автора была создана уникальная территориально-распределенная сеть, в настоящее время состоящая из четырех непрерывно функционирующих радиотелеметрических пунктов комплексных скважинных геофизических измерений с центром сбора и обработки информации.

Периодизация скважинных наблюдений естественно распадается на два интервала, с использованием разных датчиков ГАЭ. В качестве замечаний можно отметить, что следовало бы более детально обсудить различие записей 1-го и 2-го этапов мониторинга, когда датчики ГАЭ писали третью и вторую производные смещений соответственно. Отметим также, что не приведено полное описание всех используемых скважин, хотелось бы видеть в диссертации рисунки по всем скважинам, аналогичные рисункам 2.5 и 2.6.

В третьей главе - Проявление влияния электромагнитных воздействий на геоакустические процессы - обсуждается один из ключевых моментов диссертации: связь между изменениями характеристик внешнего ЭМИ и ГАЭ, характер откликов ГАЭ на изменения напряженно-деформированного состояния геосреды. К этому кругу вопросов примыкает проблема суточного хода слабой сейсмичности.

Автор демонстрирует эффект деградации суточного хода ГАЭ в окрестности сильных-близких землетрясений. Ищется фактор, определяющий характер суточных вариаций ГАЭ и в результате сопоставления различных воздействий предпочтение отдается воздействию внешнего переменного электрического поля. Убедительный пример приведен на рис.3.19, где дан интервал времени аварийного отключения подстанции ЛЭП, расположенной в 500 м от скважины Г-1, что сопровождалось одновременным резким уменьшением уровня и ЭМИ и ГАЭ.

Эффект модулирующего воздействия внешнего электромагнитного излучения на интенсивность геоакустической эмиссии подкрепляется результатами лабораторных экспериментов с образцами горных пород и масштабными натурными экспериментами с сильными искусственными электрическими полями. Отметим, что эксперименты проводились в существенно более жестких условиях - с большими напряженностями электрического поля, в условиях высокого обводнения образцов и при субразрушающих величинах напряжений. Наличие аналогичного эффекта при скважинных наблюдениях связывается с большим объемом шумовой зоны, отслеживаемой датчиками ГАЭ.

Завершается глава 3 обсуждением связи суточной периодичности слабых землетрясений с вариациями естественного электромагнитного сверхнизкочастотного (СНЧ) излучения. Автором делается вывод, что эта связь аналогична явлениям, наблюдавшимся в ходе лабораторных и натурных экспериментов и по результатам скважинных геоакустических измерений. Вывод подкрепляется сравнением графика суточных вариаций числа слабых землетрясений класса $K \leq 8.0$ с графиком суточных вариаций среднеквадратических значений ЭМИ естественного происхождения на Камчатке (рис.3.35). Известной альтернативой такой интерпретации является рост числа слабых землетрясений в ночное время в связи с меньшим уровнем шумовой помехи (как антропогенной, так и естественной). В качестве замечания можно отметить, что автор недостаточно полно рассматривает такую альтернативную интерпретацию. Роль разных условий регистрации можно было бы уточнить, используя данные о зависимости глубины суточной модуляции числа землетрясений от их магнитуды и от других параметров, чувствительных к условиям их регистрации. Автор указывает, что некоторые такие сопоставления были сделаны, но в диссертации они не приводятся.

Отметим также, что решение вопроса о наличии/отсутствии деградации суточного хода ГАЭ в диссертации приводится как бы «по результатам визуального анализа». Такого рода оценка сильно субъективна, и было бы желательно использовать некую формальную процедуру.

В **четвертой главе** диссертации обсуждаются возможные физические механизмы влияния переменных электрических полей на интенсивность геоакустической эмиссии. Анализ возможности возникновения эффекта вследствие пьезоэлектрических свойств пород позволяет сделать вывод, что такой эффект может играть только сугубо второстепенную роль. Обсуждается роль влагонасыщенности пород и их напряженного состояния. Натурные эксперименты с откачкой воды скважины подтверждает сильное влияние такого рода воздействий на амплитуду откликов ГАЭ на внешнее ЭМИ. При этом тренды изменений уровня

ГАЭ оказываются близкими в разных частотных диапазонах звукового диапазона. На основании этих экспериментов делается вывод о сильной зависимости амплитуд откликов ГАЭ от влагонасыщенности пород шумовой зоны и скорости фильтрации жидкого флюида в этой зоне.

Основным содержанием главы 4 является обсуждение предлагаемого механизма модулирующего влияния ЭМИ на уровень ГАЭ. Вполне понятно, что такое влияние должно реализовываться через некоторую электрически не нейтральную и широко распространенную в горной породе структуру. Такой структурой автор полагает двойной электрический слой (ДЭС), возникающий по границам раздела твердой и жидкой фаз в массивах горных пород. Автор предлагает модель, когда такое модулирующее воздействие порождается воздействием внешнего электрического поля на электрически заряженный слой жидкости ДЭС вблизи границы с твердой фазой; предполагается, что вызванные этим воздействием возмущения скорости медленного течения жидкости и являются причиной модуляции ГАЭ. Скорости такого смещения слоя жидкости оцениваются величиной порядка 10^{-9} м/с, что много меньше характерной скорости течения жидкости в поле гидравлических давлений в верхах земной коры, оцениваемой как 10^{-6} м/с. Предложенная модель позволяет сделать важный вывод, что для сухих пород проявление эффекта модулирующего воздействия внешнего ЭМИ на интенсивность ГАЭ невозможно. Отсюда эффекты деградации суточного хода в окрестности сильных близких землетрясений интерпретируются автором как следствие возмущения поля напряжений и выжимания или оттока жидкого флюида из пород контролируемой геофоном шумовой зоны. В условиях малой доли жидкого флюида остаточные эффекты ГАЭ связываются автором с возрастанием сил трения скольжения между гранулами пород и бортами существующих трещин.

Комплекс данных по изменениям интенсивности ГАЭ; наличию/отсутствию откликов ГАЭ на внешнее ЭМИ; изменениям удельного электрического сопротивления пород прискважинной зоны; дебиту, уровню и минерализации воды скважин позволяет автору получить предположительно однозначную физическую трактовку происходящих процессов. При этом определяющими характеристиками являются характер и уровень напряженно – деформированного состояния, а также влагонасыщенность пород околоскважинного пространства. Завершается глава обсуждением влияния электрокинетических процессов на характеристики ГАЭ. Автор поясняет, как изменения электрических параметров ДЭС в результате электрокинетических процессов влияет на интенсивность генерации упругих волн в порово-трещинном пространстве, что находит отражение в изменениях амплитуд откликов

ГАЭ на внешнее переменное электрическое поле. Отметим в качестве замечания, что в автореферате диссертации вопросам влияния на амплитуды откликов ГАЭ электрокинетических процессов внимание не уделено. В качестве замечаний по данной главе можно также отметить некоторую терминологическую нечеткость. Например, как синонимы употребляются слова «влажносодержание, флюидосодержание и флюидонасыщенность». В отдельных случаях не ясно, что означает «рост притока флюида» - увеличение его концентрации или рост интенсивности потока флюида. Такие неоднозначности затрудняют понимание текста. Неясность возникает и когда автор пишет «с изменением сил трения скольжения между гранулами пород и бортами существующих трещин». Не ясно в чем состоит отличие гранул пород от материала бортов трещин. Не вполне очевидно также, что весьма малые гармонические изменения скорости течения водной фазы способны вызывать наблюдаемые сильные суточные вариации ГАЭ. Трудно предложить альтернативу роли двойного электрического слоя, но конкретный механизм реализации процесса, возможно, может и отличаться от предложенного автором.

В 5-й главе – Применение результатов исследований для развития методов комплексного геофизического мониторинга напряженно – деформированного состояния геосреды - обсуждаются результаты в плане выявления изменений напряженно-деформируемого состояния геосреды и прогноза землетрясений, что является важным прикладным аспектом проведенных исследований.

В начале главы обсуждается комплекс данных полученных в окрестности сильных-близких землетрясений 1-го этапа (2001 - 2003 гг.) и 2-го этапа (2009 - 2016 гг.) наблюдений, различающихся характеристиками использовавшихся датчиков ГАЭ и структурой системы наблюдений. По комплексу результатов мониторинга ЭМИ и ГАЭ, по данным об изменениях удельного сопротивления пород в районах скважин, о дебите и минерализации воды скважин автор обосновывает возможность однозначной трактовки состояния флюидонасыщенности среды и характера ее напряженно-деформируемого состояния. В обобщенном виде эти данные описываются набором типовых сценариев изменения ситуации - уменьшения/увеличения всесторонних сжимающих напряжений в районе скважины и наличия влажнонасыщенной или эффективно осушенной геосреды.

Автор подчеркивает, что разработанные им методы ориентированы на мониторинг напряженно-деформируемого состояния геосреды. То есть, эти методы нацелены на обеспечение необходимой информационной основы для прогнозов землетрясений, но сами

такowymi не являются. Такая точка зрения, возможно, объясняет отсутствие у автора интереса к подробному обсуждению эффективности разработанных им подходов как методов прогноза землетрясений. Для результатов прогнозов в реальном времени за период 2004 - 2008 гг. автор приводит оценку эффективности прогноза (по критерию А.А.Гусева) как статистически незначимую, а для второго этапа измерений (2010 - 2016 гг.) оценка эффективности не приводится вовсе. Представляется желательным все же оценить эту эффективность и сравнить ее с эффективностью других методов, прежде всего, используемых для прогноза землетрясений на Камчатке в сходных условиях.

В качестве замечаний к 5-й главе также укажем следующее. Не на всех приводимых графиках дана степень близости данного землетрясения, характеризуемая параметром S - определяемым комбинацией магнитуды и эпицентрального расстояния. И автором не приводятся данные, отвечают ли данному землетрясению растягивающие или сжимающие напряжения в секторе расположения наблюдательной скважины. Автором не делается попытка оценить ориентацию горизонтальных датчиков X , Y - про которые известна только их ортогональность. Представлялось бы оправданным проанализировать реакцию наблюдательной сети в тех случаях, когда характер изменений напряженного состояния можно определить независимыми способами. Такого рода оценки можно было бы получить, например, базируясь на данных о фокальных механизмах близких-сильных землетрясений.

В кратком **Заключении** автор суммирует основные результаты проведенной работы.

Научная новизна и теоретическая значимость диссертации в первую очередь связаны с выявлением нового эффекта модуляции интенсивности ГАЭ переменным электрическим полем. Значительный вклад в теоретические представления о физических закономерностях и особенностях механизмов генерации ГАЭ вносят 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 землетрясений.

Достоверность приводимых в диссертации основных результатов обеспечивается большим объемом оригинального наблюдательного материала, совместным анализом результатов лабораторных и натурных экспериментов и результатов многолетних комплексных скважинных измерений в режиме мониторинга.

В плане **практической значимости** диссертации следует отметить, что с 2002 г. результаты исследований начали использоваться для геофизического мониторинга напряженно-

деформированного состояния геосреды в районе г.Петропавловска – Камчатского. 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 текущей сейсмической опасности Камчатки.

Оценивая в целом диссертацию следует отметить хороший стиль изложения и практическое отсутствие опечаток в тексте.

Заключение. Диссертационная работа Гаврилова Валерия Александровича является законченной научно-квалификационной работой, основные результаты которой в должной мере отражены в научных публикациях в изданиях из перечня ВАК и прошли апробацию на многочисленных международных и российских конференциях. Автореферат отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа соответствует требованиям, установленным п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842 «О порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к докторским диссертациям, а Гаврилов Валерий Александрович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.10 «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых»

Официальный оппонент:

Родкин Михаил Владимирович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории теории прогноза землетрясений Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН».

Адрес института: 117997, Москва, ГСП-7, Профсоюзная ул., д. 84/32. Тел.: 8(495)333-45-13. Факс: 8(495)333-41-21. e-mail: rodkin@mitp.ru

Я, Родкин Михаил Владимирович, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой Диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Подпись д.ф.-м.н. М.В. Родкина удостоверяю.
Ученый секретарь ИТПЗ РАН

05 мая 2017 г.

Родкин Михаил Владимирович

к.т.н. Кузнецов Игорь Васильевич

