УДК 550.34

О ВОЗМОЖНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ПРИРОДЕ НЕКОТОРЫХ АНОМАЛИЙ СРЕДНЕГО УРОВНЯ ГЕОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

В.А.Гаврилов[1], Ю.Ю.Яковлева[1], Н.Н.Смолина[2]

1. Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН
г. Петропавловск-Камчатский, vgavr@kscnet.ru
2. ФГУП «Камчатгеология»
г.Елизово Камчатской обл., prognoz_elz@mail.kamchatka.ru

Введение

С 2000 г. на пункте Г-1, расположенном в районе г. Петропавловска–Камчатского, ведутся непрерывные комплексные геофизические наблюдения, ориентированные на разработку новых методов геофизического мониторинга напряженно–деформированного состояния геосреды и прогноза землетрясений. С августа 2000 г. на пункте ведутся непрерывные геоакустические измерения с использованием датчиков, установленных в скважине на глубине около 1000 м. С мая 2003 г. геоакустические наблюдения были дополнены измерениями естественного электромагнитного излучения в СНЧ-диапазоне частот (30÷1200 Гц) с использованием подземной электрической антенны.

Установка геофона на глубине около 1000 м позволила снизить уровень шумов техногенного происхождения примерно на два порядка, а также практически полностью устранить влияние метеоусловий на результаты измерений вертикальной компоненты сигнала. Анализ результатов геоакустических измерений показывает, что в интервалах времени, соответствующих спокойной сейсмической обстановке в регионе, временные ряды измерений уровня геоакустической эмиссии (ГАЭ) содержат ярко выраженную суточную компоненту (24,0 ч), в то время, как перед всеми землетрясениями с $M_{LH} \geq 5.0$ в зоне радиусом $R \leq 300$ км от пункта наблюдений и перед землетрясениями с $M_{LH} \geq 5.5$ в зоне $R \leq 550$ км отмечалось исчезновение суточного хода ГАЭ [3]. Вопросы, связанные с физическим механизмом суточного хода ГАЭ, были рассмотрены в [3,4]. При этом было показано, что суточный ход ГАЭ может являться следствием модуляции процесса микротрещинообразования геосреды естественным электромагнитным полем Земли. Исчезновение суточного хода ГАЭ перед достаточно сильными землетрясениями и последующее его восстановление может быть объяснено изменением чувствительности геосреды к модулирующему электромагнитному воздействию вследствие изменений ее напряженно–деформированного состояния.

В данном сообщении основное внимание уделено возможным физическим причинам аномальных изменений среднего уровня ГАЭ. Для интерпретации полученных результатов в дополнение к результатам наблюдений на пункте Г-1 были привлечены данные гидрогеодинамических измерений, проводимых ФГУП «Камчатгеология» на скважине 1303, расположенной в 21 км от пункта Г-1. Результаты гидрогеодинамических измерений, как установлено к настоящему времени, в значительной мере (с учетом влияния осадков и тензочувствительности скважин) отражают изменения напряженно-деформированного состояния геосреды [7]. При этом повышение уровня воды в скважине соответствует сжатию водоносных пород и развитию упругих деформаций, а снижение уровня воды - растяжению пород.

Аппаратура и методика измерений.

Пункт комплексных скважинных геофизических измерений Г-1 ($53{,}05^0$с.ш.; $158{,}63^0$в.д.) создан на базе скважины Г-1, имеющей глубину 2540 м. Скважина расположена в зоне Авачинского глубинного разлома северо–западного направления Южно-Камчатской складчатой зоны. Скважина заполнена водой, обсажена на всю глубину.

Для геоакустических измерений используется трехкомпонентный геофон МАГ-3С с датчиками на основе магнитоупругих материалов, разработанный в Институте физики Земли РАН [2]. Сигнал на выходе датчика такого типа пропорционален третьей производной от смещения грунта, а крутизна амплитудно-частотной характеристики датчика в пересчете к смещению составляет 60 дБ на декаду изменения частоты. Такая характеристика позволяет измерять уровень естественного геоакустического фона с амплитудами сигналов в пересчете к смещению грунта

менее $1*10^{-10}$ м. Геофон установлен на глубине 1035 м и прижат к обсадной трубе скважины рессорной пружиной. Чувствительность вертикального канала геофона по выходу его предварительного усилителя составляет 0,15 В*с^3/м, резонансная частота датчика - 1250 Гц. С выходов усилителей геофона сигналы по бронированному кабелю передаются к устью скважины, где осуществляется их дополнительное усиление, последующее разделение исходных сигналов каждого датчика геофона полосовыми узкополосными третьоктавными фильтрами на четыре полосы с центральными частотами 30, 160, 560 и 1200 Гц с измерением средневыпрямленных значений сигналов на выходах фильтров. Дальнейшая обработка сигналов производится микропроцессорным контроллером, в функции которого входит аналого-цифровое преобразование поступающих на вход сигналов (частота квантования 32 Гц на канал), вычисление средних значений сигналов на интервале в одну минуту, а также запись данных в память. По запросу оператора данные измерений по телефонному каналу связи передаются в центр сбора и обработки информации Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН.

Непрерывные измерения уровня воды на скважине 1303 ($53,14^0$с.ш.; $158,35^0$в.д.) осуществляет ФГУП «Камчатгеология» с февраля 2001 г. В геолого-структурном отношении пункт 1303 расположен в одной зоне с пунктом Г-1. Скважина 1303 имеет глубину 800 м, обсажена до 517 м. Скважина вскрыла напорные воды верхнемиоцен-плиоценовых вулканогенных образований юго-восточной части Авачинского артезианского бассейна. Водовмещающие породы: переслаивание туфопесчаников, туфоалевролитов, туфобрекчий. Глубина появления воды - 60 м. Установившийся уровень воды – 25,3 м. По химическому составу воды гидрокарбонатно-сульфатные, натриево-кальциевые, с минерализацией 0,67 г/дм^3. На пункте проводятся одновременные измерения уровня воды, атмосферного давления, температуры воды и воздуха системой сбора данных "Кедр-А2". Интервал измерений – 10 минут. Разрешающая способность датчика уровня воды составляет 0,2 мм. Основная погрешность измерений уровня воды и атмосферного давления - 0,5%.

Для корректного использования ряды измерений уровня воды были подвергнуты обработке в целях компенсации влияния изменений атмосферного давления и устранения сезонной компоненты. Для компенсации влияния изменений атмосферного давления использовался пакет программ, разработанный А.А.Любушиным (ИФЗ РАН) [6]. Для оценки и фильтрации сезонной компоненты использовались алгоритмы и программы, разработанные А.В.Дещеревским (ИФЗ РАН) [5].

Основные результаты измерений и их обсуждение.

На рис.1 представлены результаты измерений среднего уровня ГАЭ в сопоставлении с изменениями уровня воды в скважине 1303 и сейсмической активностью региона. Для обработки временных рядов ГАЭ использовался программный пакет ABD, разработанный А.В.Дещеревскими и В.И.Журавлевым (ИФЗ РАН). Выделение среднего уровня ГАЭ при этом проводилось с использованием семисуточного скользящего окна. Сейсмологические данные были получены из каталогов землетрясений Камчатского филиала Геофизической службы РАН.

Проведенный анализ данных позволяет отметить следующие закономерности. Понижению уровня воды в скважине 1303, как правило, соответствовало снижение среднего уровня ГАЭ (интервалы: ноябрь-декабрь 2001 г.; февраль-март 2002 г.; май-август 2002 г.; декабрь 2002 г.- февраль 2003 г.; апрель 2004 г.- май 2004 г. и др.). Более сложной выглядит закономерность изменений среднего уровня ГАЭ на интервалах повышения уровня воды в скважине 1303. В большинстве случаев (интервалы: май – июль 2001 г.; 15.08. – 10.09.2001 г.; 15.05. – 31.05.2002 г.; 20.12. – 31.12.2004 г.; май 2005 г.; 10.07. – 25.07.2005 г.) повышению уровня воды соответствовало повышение среднего уровня ГАЭ. Однако в ряде случаев (интервалы: октябрь 2001 г.; 01.05 - 15.05.2002 г.; ноябрь 2002 г.) указанная закономерность нарушалась, что в целом говорит о сложности физических процессов, являющихся первопричинами флуктуаций характеристик ГАЭ. В этой связи на некоторых интервалах наблюдений особенности изменения характеристик ГАЭ были рассмотрены более детально.

На рис.2 представлены результаты измерений уровня ГАЭ на интервале июль-декабрь 2001 г. в сопоставлении с изменениями уровня воды в скважине 1303.

При этом также учитывались нарушения суточного хода ГАЭ. Указанный период примечателен, прежде всего, роем землетрясений в октябре 2001 г. в районе Авачинского залива.

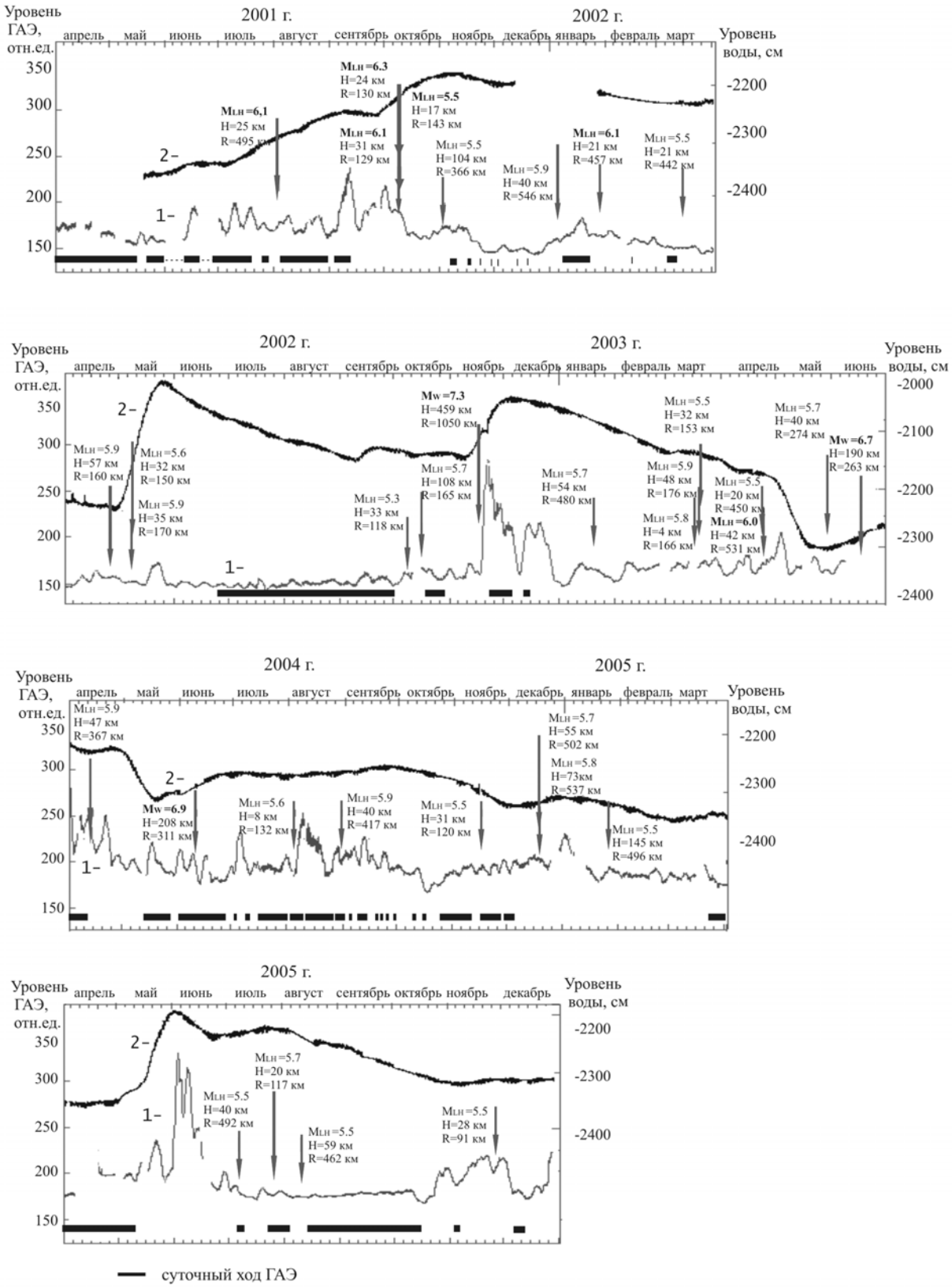

Рис.1. Изменения среднего уровня ГАЭ (1) в сопоставлении с изменениями уровня воды на скв. 1303 (2) и сейсмической активностью. Указаны землетрясения с $M_{LH} \geq 5.4$ в зоне $R \leq 300$ км от пункта Г-1 и землетрясения с $M_{LH} \geq 5.5$ в зоне радиусом $R \leq 550$ км. Землетрясение 17.11.2002г. с $M_W=7.3$ произошло на эпицентральном расстоянии 1050 км. **Примечание:** пропуск данных с июля 2003г. по апрель 2004г. вызван техническими причинами.

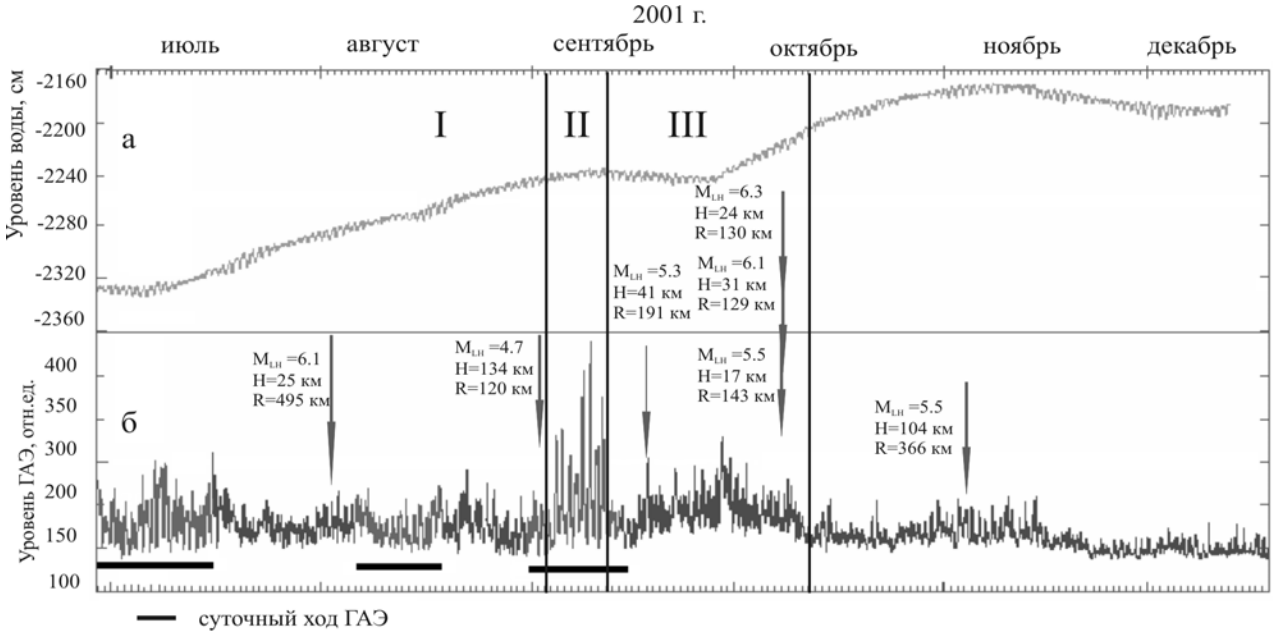

Рис.2 . Вариации уровня геоакустической эмиссии в сопоставлении с изменениями уровня воды:
а - уровень воды в скважине 1303; б - уровень ГАЭ, вертикальная компонента Z, диапазон 160 Гц.

Магнитуда наиболее сильного землетрясения роя составила M_{LH}=6.3, эпицентр находился на расстоянии 130 км от измерительного пункта. Землетрясение ощущалось в г.Петропавловске–Камчатском силой около 4 баллов и сопровождалось многочисленными афтершоками.

Последовательность развития заключительного этапа подготовки роя землетрясений, условно, можно разделить на три стадии. На стадии I (интервал с 8 июля по 1 сентября 2001 г.) уровень воды в скважине 1303 повысился на 90 см, т.е. в этот период наблюдался активный рост сжимающих напряжений. Как видно на рис.2, спустя шесть суток после начала роста напряжений было зарегистрировано нарушение суточного хода ГАЭ и началось снижение среднего уровня ГАЭ. Стадии I завершилась близким (R=120 км) землетрясением с магнитудой M_{LH}=4.7, сразу после которого на интервале 2÷11 сентября (II стадия) наблюдалось восстановление суточного хода ГАЭ, причем его максимальная амплитуда была почти в два раза выше амплитуды суточного хода перед началом активного роста сжимающих напряжений. К стадии III можно отнести интервал 11 сентября – 11 октября. В начале стадии III отмечалось некоторое снижение сжимающих напряжений, при этом их локальный минимум совпал по времени с максимумом бухтообразной аномалии среднего уровня ГАЭ, зарегистрированной в этот период. На заключительном этапе стадии III (28 сентября – 11 октября 2001 г.) началось достаточно быстрое уменьшение уровня ГАЭ на фоне начавшегося еще более активного роста сжимающих напряжений.

Для правильной интерпретации вышеуказанных результатов необходимо, на наш взгляд, подчеркнуть следующие наиболее важные моменты.

Во-первых, обращает на себя внимание наличие бухтообразной аномалии среднего уровня ГАЭ на стадии III, приуроченной по времени к падению напряжений. Такое развитие процесса подготовки роя землетрясений соответствует, на наш взгляд, модели лавинно-неустойчивого трещинообразования (ЛНТ) [8]. Такие взаимосвязанные изменения уровня ГАЭ и уровня воды на стадии III в рамках модели ЛНТ могут быть объяснены развитием неустойчивой деформации, локализующейся в узкой зоне будущего макроразрыва.

Необходимо также отметить нарушения суточного хода и снижение среднего уровня ГАЭ перед всеми указанными на рис.2 землетрясениями, а также восстановление суточного хода после землетрясений, произошедших 2 августа и 1 сентября 2001 г. Как было показано в [3,4], эффект нарушения суточного хода ГАЭ перед достаточно сильными землетрясениями может быть объяснен изменением напряженно-деформированного состояния геосреды. Последующее восстановление суточного хода ГАЭ можно объяснить тем, что в результате близких или достаточно сильных удаленных землетрясений происходит снятие значительной доли

накопленной упругой энергии и переходу геосреды в ее "фоновое" состояние, в котором чувствительность геосреды к модулирующему воздействию электромагнитного поля достаточно высока. Под модулирующим воздействием электромагнитного поля в данном случае понимается его воздействие на процессы микротрещинообразования горных пород, что в естественных условиях выражается в проявлении суточного хода ГАЭ [3,4]. При этом, как показывают результаты экспериментов на образцах горных пород, чувствительность процесса микротрещинообразования к воздействию внешнего электромагнитного поля зависит от величины сжимающих напряжений и максимальна в области нагрузок 80-90% от разрушающих [1,9]. В этой связи можно предположить, что повышение амплитуды суточного хода ГАЭ на интервале 2÷11 сентября 2001 г. было обусловлено именно этой закономерностью: снятие доли накопленной упругой энергии в результате близкого землетрясения 1.09.2001 г. вернуло геосреду в ее "фоновое" состояние, а воздействие на этом временном интервале более высоких, чем на стадии I, сжимающих напряжений обусловило более высокую амплитуду суточного хода ГАЭ. Вместе с тем, необходимо учитывать, что повышение амплитуды суточного хода ГАЭ может быть связано также и с соответствующим повышением амплитуды суточного хода естественного электромагнитного поля, модулирующего процесс микротрещинообразования. Из-за отсутствия в 2001 г. на пункте Г-1 системы электромагнитных измерений для данного случая трудно оценить возможное влияние на амплитуду суточного хода ГАЭ изменений уровня естественного электромагнитного поля. Однако, аналогичный эффект резкого увеличения амплитуды суточного хода ГАЭ наблюдался также в ряде других случаев, например, после роя землетрясений в районе Авачинского залива (R≈130 км) в августе 2004 г. (рис.3).

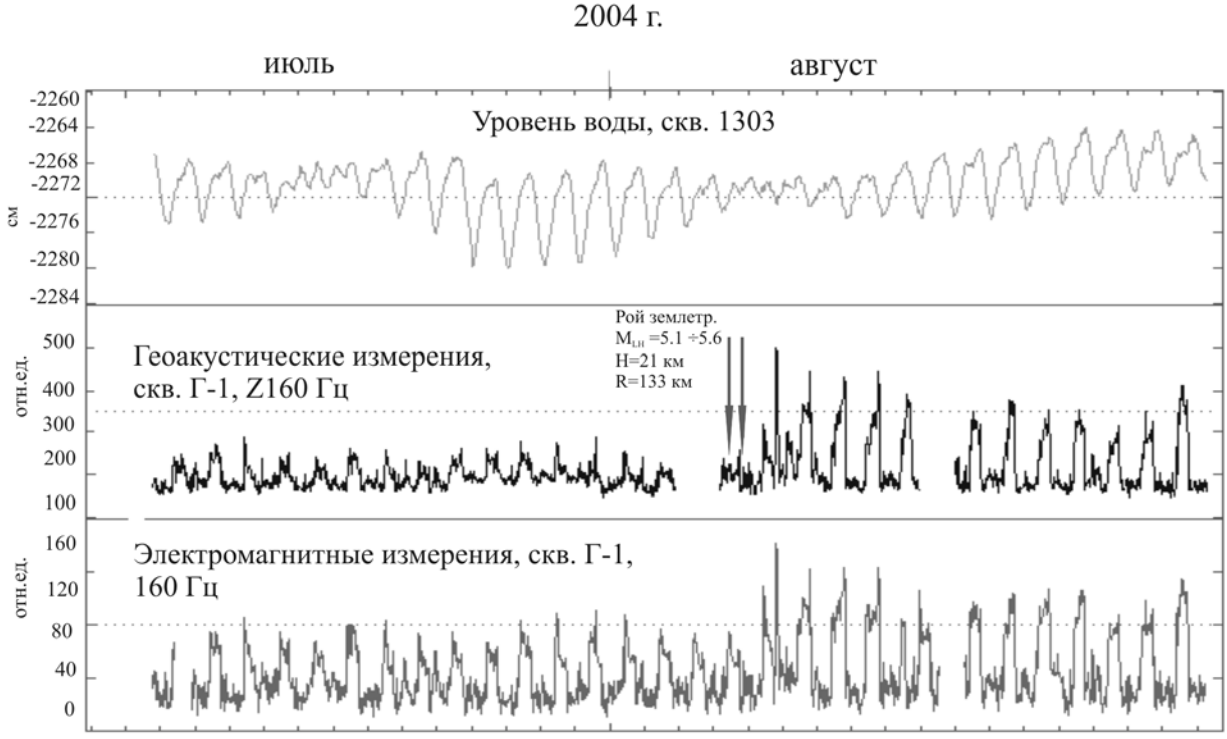

Рис.3. Вариации уровня геоакустической эмиссии в сопоставлении с изменениями естественного электромагнитного излучения и уровня воды.

Сравнение результатов геоакустических и электромагнитных наблюдений, представленных на рис.3, показывает, что после роя землетрясений в августе 2004 г. амплитуда суточного хода ГАЭ увеличилась почти на 200%, в то время как амплитуда суточных вариаций электромагнитного излучения возросла не более чем на 50%. При этом средний уровень воды в июле-августе практически оставался неизменным. На основании этих результатов можно сделать вывод, что в данном случае повышение амплитуды суточного хода ГАЭ можно объяснить изменением чувствительности геосреды в точке наблюдений к модулирующему воздействию внешнего электромагнитного поля в результате сброса части накопленной упругой энергии.

Выводы

1. Привлечение данных гидрогеодинамических наблюдений к анализу результатов скважинных геоакустических измерений дает возможность более глубокого исследования физических причин аномальных изменений характеристик геоакустической эмиссии.

2. Совместный анализ данных геоакустических и гидрогеодинамических наблюдений показывает, что изменения основных характеристик геоакустической эмиссии на заключительном этапе подготовки роя землетрясений ($M_{LH} \leq 6.3$) в октябре 2001 г. в районе Авачинского залива можно объяснить в рамках модели ЛНТ.

3. Повышение амплитуд суточного хода геоакустической эмиссии, наблюдаемое в ряде случаев после близких землетрясений, может быть объяснено изменением чувствительности геосреды в точке наблюдений к модулирующему воздействию естественного электромагнитного поля в результате сброса части накопленной упругой энергии.

Авторы выражают признательность Г.П.Декину (ФГУП «Камчатгеология») за помощь в организации совместной обработки данных геоакустических и гидрогеодинамических наблюдений.

Работа выполнена при финансовой поддержке ДВО РАН (проект 06-III-А-08-327) и РФФИ (проект 06-05-96071).

Список литературы

1. Аладьев А.В., Богомолов Л.М., Боровский Б.В.,Закупин А.С., Ильичев П.В., Сычев В.Н. Закономерности акустической эмиссии образцов геоматериалов, испытываемых на ползучесть при энерговоздействиях физическими полями// Проблемы сейсмологии III-го тысячелетия. Новосибирск. Изд-во СО РАН. 2003. С. 168-172.

2. Беляков А.С. Магнитоупругие акустические геофоны для геофизических исследований // Сейсмические приборы. М.: ОИФЗ РАН, 2000. Вып. 33. С. 27 - 45.

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. Гаврилов В.А. К вопросу о физической природе суточных вариаций уровня геоакустической эмиссии. Материалы IV Всероссийского симпозиума «Сейсмоакустика переходных зон». Владивосток. 2005. С.89-93.

5. Дещеревский А.В., Сидорин А.Я. Некоторые вопросы методики оценки среднесезонных функций для геофизических данных. М.: ОИФЗ РАН, 1999. 40 с.

6. Любушин А.А. (мл.). Многомерный анализ временных рядов систем геофизического мониторинга // Физика Земли.1993.№3.С.103-108.

7. Киссин И.Г. Высокоамплитудные предвестники землетрясений и чувствительные зоны земной коры // Изв. АН СССР. Физика Земли.1988. № 6.С.3-13.

8. Мячкин В.И., Костров Б.В., Соболев Г.А., Шамина О.Г. Основы физики очага и предвестники землетрясений // Физика очага землетрясения. М.: Наука. 1975.С.6-29.

9. Bogomolov L., Zakupin A., Alad'ev A., Tullis T. Acoustic emission measurements to understand transition straining processes and seismicity triggering by power impacts //In: Applications of Cybernetics and Informatics in Optics,Signals, Science and Engineering, Ed by Callaos N. (Proc. 8 th Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics), Vol.XII. Orlando, USA. 2004. P.274-279.