

УДК 550.34+550.343

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ НА  
ИЗМЕРИТЕЛЬНОМ ПУНКТЕ «СКВАЖИНА Г-1».

**В.А. Гаврилов**

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский,  
683006 E-mail: [vgavr@kcs.iks.ru](mailto:vgavr@kcs.iks.ru)*

**Введение**

Комплексирование различных видов геофизических наблюдений дает принципиальную возможность значительного повышения эффективности методов мониторинга напряженно-деформированного состояния горной среды и краткосрочного прогноза землетрясений [8,10]. В ряде случаев это позволяет также более глубоко изучить физическую природу и механизмы возникновения предвестниковых аномалий. В 2000 г. на базе скважины Г-1, расположенной в районе г. Петропавловска-Камчатского, были начаты комплексные непрерывные геофизические наблюдения, ставящие своей целью разработку новых методов геофизического мониторинга напряженно-деформированного состояния горной среды и прогноза землетрясений. С августа 2000 г. на пункте начали проводиться непрерывные геоакустические измерения с установкой датчиков на глубине около 1000 м. На последующих этапах были организованы непрерывные электромагнитные измерения в СНЧ-диапазоне частот (30÷1200 Гц) с использованием подземной электрической антенны, а также мониторинг изменений плотности воды в скважине.

Выбор указанных видов геофизических наблюдений не был случаен. Исходя из результатов, полученных при лабораторном физическом моделировании тектонических деформационных процессов, можно уверенно считать, что исследования пространственных и временных характеристик акустической эмиссии горных пород в естественных условиях (**геоакустические наблюдения**) потенциально высоко информативны как средство мониторинга напряженно – деформированного состояния горной среды.

Лабораторные исследования образцов горных пород под высоким давлением показывают, что аномальные изменения характеристик **электромагнитной эмиссии**, также как и акустической эмиссии, возникают вследствие неупругих деформаций пород. В этой связи одновременные измерения обоих видов излучений в естественных условиях дают возможность глубже понять физический смысл получаемых результатов и более уверенно их интерпретировать. Для электромагнитных измерений на пункте Г-1 была применена **подземная** вертикальная электрическая антенна, в отличие от традиционно используемых наземных антенн. Это было обусловлено, в первую очередь, тем, что в соответствии с законами электродинамики регистрация электромагнитных сигналов литосферного происхождения антеннами, расположенными над землей, затруднена ввиду намного меньшей проводимости воздуха, чем земли, что делает маловероятным выход электромагнитного излучения из литосферы в атмосферу.

Третий вид наблюдений на пункте Г-1 - **мониторинг изменений плотности воды в скважине** - был организован в целях контроля изменений объемов свободных и

растворенных в воде газов. На высокую прогностическую эффективность измерений концентраций растворенных в воде газов указывают, в частности, результаты режимных измерений параметров морской среды, проведенных в 1991-1997 гг. в акватории Авачинской бухты в районе г. Петропавловска-Камчатского по методике, разработанной Г.Г. Ткаченко и Б.Б. Капочкиным [3,9]. По своей физической сути изменения объемов свободных и растворенных в воде газов также связаны, прежде всего, с процессами трещинообразования в результате деформирования горных пород.

#### ***Аппаратура и методика наблюдений***

Измерительный пункт Г-1 (53.05<sup>0</sup> с.ш.; 158.63<sup>0</sup> в.д.) оснащен скважиной глубиной 2540 м. Скважина заполнена водой, самоизливающаяся, обсажена на всю глубину.

***Геоакустические измерения*** на пункте Г-1 были начаты в августе 2000 г. Для измерений был использован трехкомпонентный геофон МАГ-3С [1] с датчиками на основе магнитоупругих кристаллических ферромагнетиков. Крутизна амплитудно-частотной характеристики датчиков составляет 60 дБ на декаду изменения частоты (велахметрическая характеристика, измеряемая величина - третья производная от смещения). Геофон установлен на глубине 1035 м и прижат к обсадной трубе скважины рессорной пружиной. Полосовыми третьоктавными фильтрами, установленными вблизи устья скважины, осуществляется разделение исходных сигналов датчиков 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 команде оператора данные измерений передаются по телефонному каналу связи в центр сбора и обработки информации Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (в обычном режиме - раз в сутки).

***Измерения естественного электромагнитного поля Земли*** на пункте Г-1 были начаты в мае 2003 г. Для электромагнитных измерений применена подземная электрическая антенна, элементами которой являются свободная жила кабеля геофона длиной более километра и обсадная труба скважины. В остальном тракты электромагнитных и геоакустических измерений идентичны, измерения проводятся в одних и тех же частотных диапазонах.

Непрерывный автоматизированный ***мониторинг изменений плотности воды в скважине*** проводится на пункте с апреля 2004 г. Методика мониторинга оригинальна, разработана автором статьи. Измерения ведутся с частотой 32 Гц с последующим усреднением данных. По результатам измерений делаются оценки изменений концентраций свободных и растворенных в воде газов.

#### ***Основные результаты измерений***

***Геоакустические измерения.*** Основные результаты геоакустических измерений на пункте Г-1 за 2000-2003 гг. приведены в [2]. Согласно проведенным измерениям, установка геофона в скважине Г-1 на глубине около 1000 м позволила снизить влияние шумов техногенного происхождения более чем на два порядка, а также практически полностью устранить влияние метеоусловий на результаты измерений вертикальной компоненты сигнала. Использование в геофоне высокочувствительных датчиков с велахметрической характеристикой дало при этом возможность измерять уровень геоакустической эмиссии (ГАЭ) с амплитудами сигналов порядка  $10^{-4}$  м/с<sup>3</sup> в диапазоне частот до 1.5 кГц. Анализ результатов измерений показывает, что в интервалах времени, соответствующих спокойной сейсмической обстановке в регионе, временные ряды среднего уровня ГАЭ содержат ярко выраженную суточную компоненту (24.0 ч). При этом времена переходов от минимальных значений среднего уровня ГАЭ к максимальным и наоборот соответствуют временам прохождения линии терминатора (временам захода и восхода Солнца) для пункта наблюдений. По результатам четырехлетних непрерывных измерений установлено, что перед всеми землетрясениями с  $M_{LH} \geq 5.0$  в зоне радиусом  $R \leq 300$  км от пункта наблюдений и

землетрясениями с  $M_{LH} \geq 5.5$  в зоне  $R \leq 550$  км отмечалось исчезновение суточного хода среднего уровня ГАЭ. В то же время, как следует из представленных данных, за период наблюдений не было отмечено ни одного землетрясения с указанными параметрами, которое произошло бы при наличии устойчивого (продолжительностью более шести суток) суточного хода ГАЭ. Вероятность случайного совпадения для такой ситуации оценивается величиной менее  $10^{-6}$ . Полученные результаты позволяют сделать вывод, что в настоящее время на основе данных скважинных геоакустических измерений с высокой степенью надежности можно, прежде всего, определять периоды, когда вероятность близких сильных землетрясений для Камчатского региона и Северных Курил очень мала - т.е. в реальном времени уверенно прогнозировать сейсмически спокойные периоды.

В период с 28.02 2002 г. по 31.07 2003 г. на основе данных геоакустических наблюдений в Совет по прогнозу землетрясений и извержений вулканов Института вулканологии ДВО РАН и Камчатской опытно-методической сейсмологической партии (КОМСП) ГС РАН еженедельно подавались заключения о сейсмической опасности для Камчатской области, при этом в девяти случаях были даны прогнозы землетрясений. Прогнозы давались, как правило, для зоны  $49.0^0-55.0^0$  с.ш.,  $156.0^0-161.3^0$  в.д. Из девяти поданных прогнозов по всем четырем параметрам (оценки времени, района, глубины, энергетического класса) оправдались семь прогнозов для землетрясений с  $M_{LH} = 5.1 \div 5.9$ . В одном случае прогноз оказался неточным по энергетической оценке (расхождение в классе землетрясения на 0.4). Фактическое время упреждения в шести случаях не превышало 15 суток, а в двух случаях составило 23 и 79 суток.

Полученный в рамках указанной работы опыт показал необходимость глубокого исследования физической природы и механизма возникновения предвестниковых аномалий, а также комплексирования различных видов геофизических наблюдений.

**Измерения естественного электромагнитного поля Земли.** Результаты электромагнитных наблюдений использовались, прежде всего, для понимания физических причин суточных вариаций уровня ГАЭ. Основные причины и особенности суточных вариаций уровня электромагнитного поля в СНЧ- и ОНЧ- диапазонах частот (10 Гц - 30 кГц) достаточно хорошо изучены [5,7]. Суточный ход уровня электромагнитного поля в этих диапазонах обусловлен изменением условий распространения атмосфериков в зависимости от времени суток в волноводе ионосфера - Земля. Согласно результатам измерений, проведенным на пункте Г-1, суточный ход электромагнитного излучения (ЭМИ) наблюдался во всем используемом частотном диапазоне (30÷1200 Гц); наиболее устойчивый суточный ход ЭМИ регистрировался на канале 160 Гц. Данные измерений показывают, что в периоды устойчивого суточного хода ГАЭ вариации уровней ГАЭ и ЭМИ практически идентичны (рис. 1, интервал 9÷12 апреля).

Вместе с тем, перед сильными землетрясениями (за сутки и более), а также в периоды релаксации, характеры вариаций уровня ГАЭ и уровня ЭМИ были существенно различны (см. рис. 1, интервал 13÷19 апреля).

В целом, результаты совместных геоакустических и электромагнитных измерений дают основания сделать вывод, что в данном случае речь может идти о проявлении в естественных условиях эффекта, отмеченного при проведении лабораторных экспериментов на образцах, подвергавшихся воздействию электромагнитных полей [4]. Согласно результатам указанных работ, при электромагнитном воздействии на образцы наблюдается достаточно четкий триггерный эффект значительного повышения уровня акустической эмиссии. В рамках предложенной гипотезы речь может идти о модуляции уровня ГАЭ естественным электромагнитным полем. Исчезновение суточного хода ГАЭ перед достаточно сильными землетрясениями и последующее восстановление его может быть объяснено изменением чувствительности горной среды к модулирующему электромагнитному воздействию вследствие изменений ее напряженно-деформированного состояния (рис. 1).

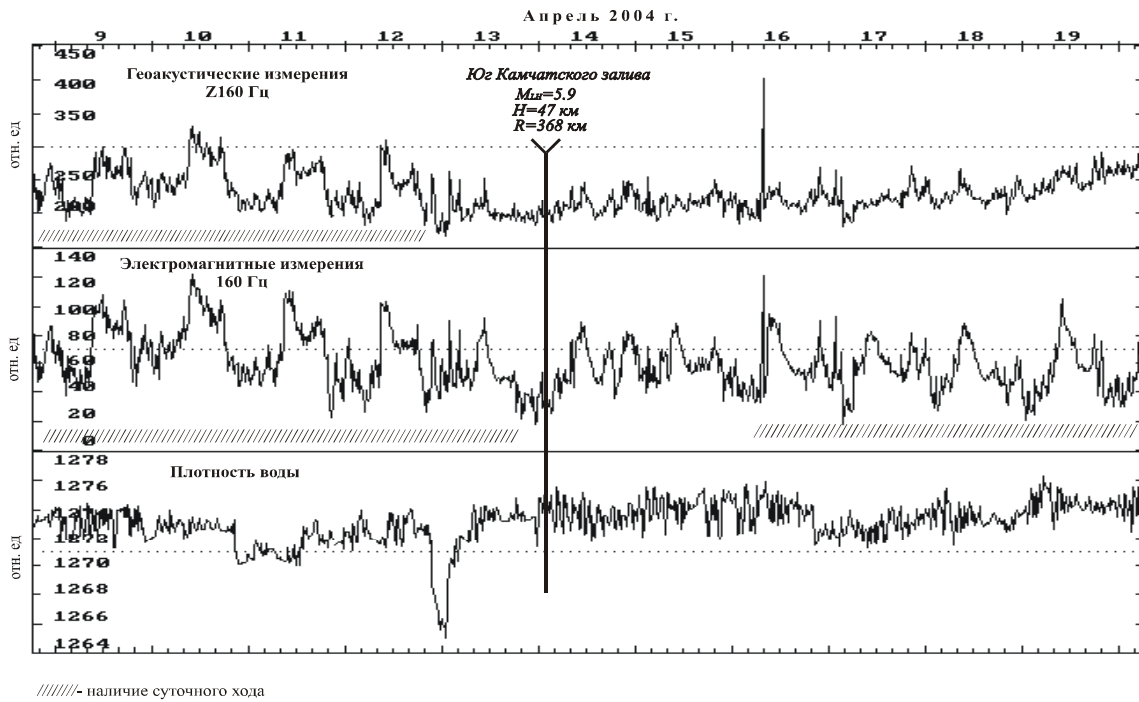


Рис. 1. Пример результатов одновременных измерений по трем видам геофизического мониторинга. Здесь и далее указано Гринвичское время.

Кроме этого, как показали результаты наблюдений, электромагнитные измерения в СНЧ-диапазоне частот с использованием подземной электрической антенны имеют и самостоятельное значение для работ по мониторингу напряженно-деформированного состояния литосферы и краткосрочному прогнозу землетрясений. За время непрерывных электромагнитных измерений на пункте Г-1 были отмечены три вида аномалий естественного электромагнитного излучения (ЭМИ), связанных, на наш взгляд, с изменениями напряженно-деформированного состояния горной среды перед землетрясениями:

- 1) искажения суточного хода ЭМИ;
- 2) бухтообразные аномалии среднего уровня ЭМИ продолжительностью до 9 суток с сохранением амплитуд суточного хода;
- 3) кратковременные (менее суток) возмущения ЭМИ импульсного характера.

В наибольшей степени аномальные изменения ЭМИ перед землетрясениями проявлялись на канале 560 Гц.

Пример **искажений суточного хода** ЭМИ перед землетрясением был приведен выше на рис. 1. Продолжительность ЭМИ с искаженным суточным ходом всегда была значительно меньше аналогичных аномалий среднего уровня ГАЭ и не превышала 9 суток.

На рис. 2 приведен пример **бухтообразной аномалии среднего уровня ЭМИ**, предшествовавшей землетрясениям на севере Курильских островов. Указанная аномалия, продолжительностью около 8 суток, наблюдалась на всех частотных диапазонах каналов измерений ЭМИ. Амплитуда суточного хода ЭМИ при этом не менялась, что говорит о сохранении условий распространения атмосфериков. Согласно результатам лабораторных экспериментов [6], такая аномалия может интерпретироваться, как результат сжатия горной среды в районе пункта наблюдений.

Наиболее яркий пример **кратковременных импульсных возмущений ЭМИ**, непосредственно предшествовавших и сопровождавших сильное землетрясение, представлен на рис. 3. В этом случае за 12 часов перед сильным глубоким землетрясением ( $M_w=6.9$ ,  $H=208$  км), произошедшем на эпицентральной расстоянии 312 км к западу от Камчатского залива, уровень ЭМИ в диапазоне 560 Гц увеличился более чем в 10 раз. Землетрясение произошло на спаде интенсивности ЭМИ. После землетрясения уровень ЭМИ оставался аномально высоким в течение последующих шести часов. Следует

отметить, что подобные по характеру ранее и в других регионах аномалии ЭМИ отмечались [6].

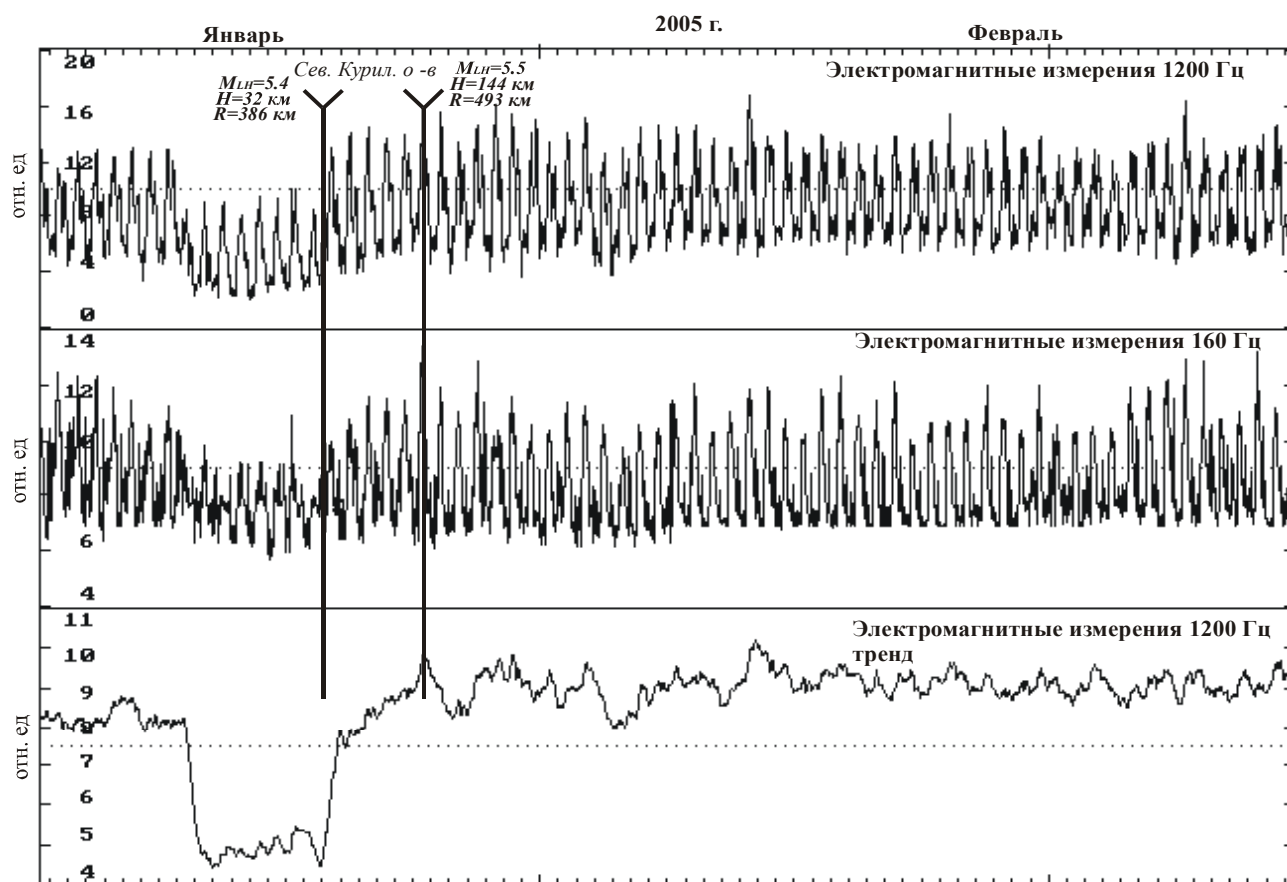


Рис. 2. Бухтообразная аномалия среднего уровня ЭМИ перед землетрясениями в северной части Курильских островов.

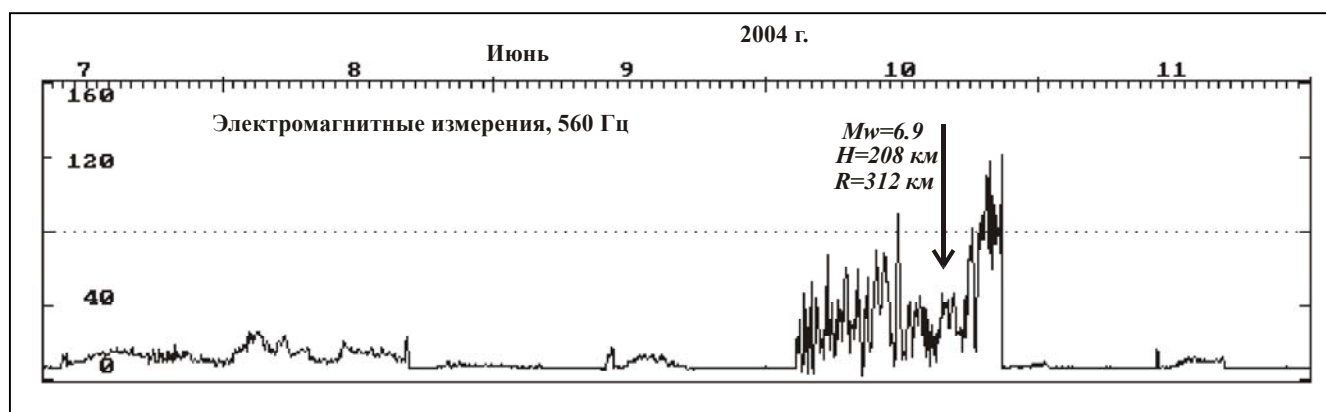


Рис. 3. Импульсные возмущения ЭМИ, предшествовавшие и сопровождавшие глубокое сильное землетрясение 10.06.2004 г. в районе Камчатского залива.

**Мониторинг изменений плотности воды в скважине.** С момента начала измерений по данному виду мониторинга (апрель 2004 г.) по декабрь 2004 г. включительно по данным КОМСП ГС РАН на эпицентральных расстояниях до 500 км от пункта наблюдений произошло шесть одиночных землетрясений с магнитудой  $M=5.1\div 6.9$  и рой землетрясений с максимальной магнитудой событий  $M_{LH}=5.6$ . Аномальные изменения плотности воды в указанный период времени были зарегистрированы в четырех случаях из семи. Выше были приведены данные, иллюстрирующие аномалию плотности воды в скважине перед землетрясением 14.04 2004 г. на юге Камчатского залива (рис.1). Данные по

изменению плотности воды за период май - декабрь 2004 г. в сопоставлении с результатами измерений уровня ГАЭ и моментами землетрясений представлены на рис.4. Как следует из приводимых данных, наиболее уверенно аномальные изменения плотности воды проявились на временном интервале 14.07.2004 г.-10.08.2004 г., где они предшествовали землетрясению с  $M_{LH}=5.4$ , произошедшему 16.07. 2004 г. в северной части Курильских островов и рою мелкофокусных землетрясений в Авачинском заливе с максимальной магнитудой  $M_{LH}=5.6$ . Максимальные значения относительных изменений плотности воды при этом достигали 1% при средних значениях фоновых вариаций около 0.2%. Три землетрясения не предварялись значимыми изменениями плотности воды - сильное глубокое землетрясение ( $M_w=6.9$ ,  $H=208$  км,  $R=312$  км), произошедшее 10.06.2004 г. западнее района Камчатского залива; землетрясение 26.06.2004 г. ( $M_{LH}=5.2$ ,  $H=20$  км,  $R=352$  км) в районе Камчатского залива и землетрясение 16.11.2004 г. ( $M_{LH}=5.3$ ,  $H=37$  км,  $R=120$  км) в районе Авачинского залива.

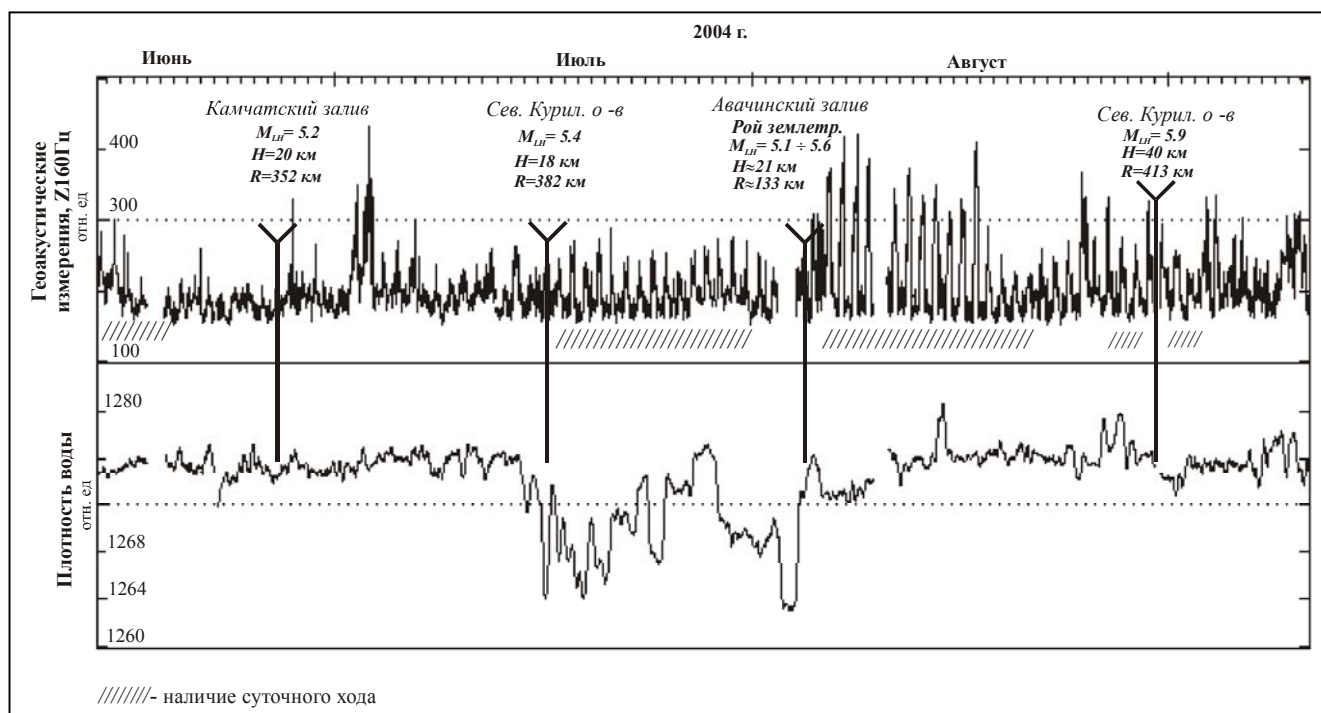


Рис. 4. Изменения плотности воды в сопоставлении с изменениями уровня ГАЭ и моментами землетрясений.

Характер изменений уровня ГАЭ за тот же период соответствовал ранее полученным результатам - перед всеми сейсмическими событиями с  $M_{LH} \geq 5.0$  нарушался суточный ход ГАЭ. Сравнение изменений плотности воды с данными по изменениям уровня ГАЭ показывает, что продолжительность аномальных изменений плотности воды перед землетрясениями, как правило, была меньше продолжительности нарушений суточного хода ГАЭ и не превышала 2-7 суток. На основании этих результатов можно сделать предварительный вывод о возможности значительного сокращения интервалов тревожного времени при краткосрочном прогнозе землетрясений в случае обработки данных геоакустических наблюдений совместно с данными мониторинга плотности воды. Изучение физического механизма аномалий плотности воды требует проведения целенаправленных исследований с привлечением данных по другим видам геофизических наблюдений.

### **Выводы**

1. На базе скважины Г-1 в р-не г. Петропавловска-Камчатского реализованы непрерывные измерения по трем видам геофизического мониторинга: измерения уровня ГАЭ на глубине около 1000 м; электромагнитные измерения в СНЧ-диапазоне частот с использованием подземной электрической антенны; мониторинг изменений плотности воды в скважине.

2. Комплексование трех видов геофизического мониторинга дает принципиальную возможность повышения надежности выявления предвестниковых аномалий, более глубокого исследования их физической природы, повышения эффективности краткосрочного прогноза землетрясений, в том числе, значительного сокращения интервалов тревожного времени.

Работа выполнена при финансовой поддержке ДВО РАН - проект № 05-1-0-02-051.

Автор выражает признательность В.А.Широкову и П.П.Фирстову за обсуждение материалов статьи и полезные замечания.

### Список литературы

1. *Беляков А.С.* Магнитоупругие акустические геофоны для геофизических исследований // Сейсмические приборы. М.: ОИФЗ РАН, 2000. Вып. 33. С. 27-45.
2. *Гаврилов В.А., Морозова Ю.В., Сторчевус А.В.* Вариации уровня геоакустической эмиссии в глубокой скважине и их связь с сейсмической активностью южной части Камчатки // Материалы IV международного совещания по процессам в зонах субдукции Японской, Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский, 2004. С. 250-252.
3. *Желтухин А.С.* Опытные-методические режимные наблюдения по проблеме краткосрочного прогноза землетрясений в морских сейсмогенных зонах // Тр. конфер. «Опыт комплексного изучения геофизических полей для целей сейсмопрогноза». М.: ВСЕГИНГЕО МПР РФ, 1998. С. 115-123.
4. *Ильичев П.В., Аладьев А.В., Богомолов Л.М. и др.* Параметры акусто-эмиссионных сигналов, инициированных электровоздействием на нагруженные образцы // Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов. Сборник материалов Второго международного симпозиума. Бишкек: ОИВТАН, 2002. С. 286-303.
5. *Орлов А.Б., Азарнин Г.В.* Основные закономерности распространения сигналов СДВ-диапазона в волновом канале Земля-ионосфера // Проблемы дифракции и распространения волн. Л.: Изд-во ЛГУ, 1970. Вып. 10. С. 3-107.
6. Поиск электромагнитных предвестников землетрясений / Под ред. Гохберга М.Б. М.: Изд-во ИФЗ АН СССР, 1988. 244 с.
7. *Ремизов Л.Т.* Естественные радиопомехи. М.: Изд-во ИРЭ АН СССР, 1985. 197 с.
8. *Соболев Г.А.* Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 313 с.
9. *Ткаченко Г.Г., Капочкин Б.Б.* Способ прогноза фаз тектонической активности. Патент РФ № 1837139. 1993.
10. *Aki K.* Probabalistic synthesis of precursory phenomena // Earthquake Prediction. Wash. (DC). 1981. P. 566-574.