

УДК 550.433

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СНЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ В ПЕРИОД ПОДГОТОВКИ И РЕАЛИЗАЦИИ КАТАСТРОФИЧЕСКИХ СИМУШИРСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ 2006-2007 гг.

В.А. Гаврилов, Е.В. Полтавцева

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006; e-mail: [vgavr@kscnet.ru](mailto:vgavr@kscnet.ru)*

С мая 2003 г. на пункте Г-1 (53<sup>0</sup>03' с.ш.; 158<sup>0</sup>40' в.д.), расположенном в черте г. Петропавловск-Камчатский, проводятся непрерывные измерения уровня естественного электромагнитного излучения (ЕЭМИ) в СНЧ-диапазоне частот с использованием подземной вертикальной электрической антенны. Основной целью указанных работ является разработка новых методов геофизического мониторинга напряженно-деформированного состояния геосреды.

### Аппаратура и методика измерений

Пункт Г-1 оснащен скважиной глубиной 2540 м, обсаженной на всю глубину. Для автоматизированных геофизических измерений на пункте Г-1 используется комплекс радиотелеметрической аппаратуры, достаточно подробное описание которого содержится в работе [1].

К основным особенностям методики и техники электромагнитных измерений в данном случае можно отнести использование подземной электрической антенны оригинальной конструкции и проведение измерений в сверхнизкочастотном диапазоне частот (25÷1500 Гц по уровню 0.5). На рис. 1 представлена схема проведения электромагнитных измерений на пункте Г-1.



Рис. 1. Структурная схема комплекса для проведения электромагнитных измерений на пункте Г-1.

Аппаратурным комплексом, расположенным у устья скважины, производится дополнительное усиление и разделение спектра исходных сигналов датчиков геофона полосовыми фильтрами на четыре полосы с центральными частотами 30 Гц, 160 Гц, 560 Гц и 1200 Гц с измерением средневыпрямленных значений сигналов на выходах каждого из фильтров. Дальнейшая обработка сигналов производится микропроцессорным контроллером, в функции которого входит аналого-цифровое преобразование поступающих на вход сигналов, вычисление средних значений сигналов на интервале в одну минуту, а также запись данных в память для дальнейшей передачи по каналу связи.

Основными элементами подземной электрической антенны являются обсадная труба скважины и свободная жила бронированного кабеля длиной более километра, погруженного в скважину, при этом броня кабеля прижата изнутри к обсадной трубе скважины. Упрощенная эквивалентная схема антенны представлена на рис. 2. При использовании указанной схемы выходное напряжение рассчитывается следующим образом:

$$U \approx j\omega M I_s, \quad I_s \approx \frac{1}{j\omega + \frac{R_s}{L_s}} U_s, \quad U \approx \frac{j\omega}{j\omega + \frac{R_s}{L_s}} U_s, \quad (1)$$

где  $I_s$  – ток экрана,  $\omega$  – круговая частота,  $M$  – взаимная индуктивность,  $U_s$  – напряжение, наводящееся на экран,  $L_s$  и  $R_s$  – соответственно индуктивность и сопротивление экрана.

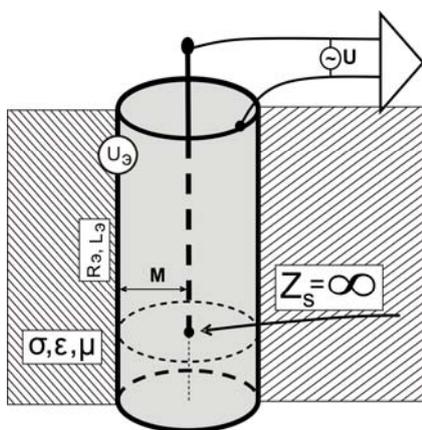


Рис. 2. Упрощенная эквивалентная схема подземной антенны:  $\sigma$  – электропроводность геосреды;  $\epsilon$  и  $\mu$  – диэлектрическая и магнитная проницаемость геосреды, соответственно.

Применение для измерений подземной электрической антенны обусловлено тем, что в соответствии с законами электродинамики выход электромагнитного излучения литосферного происхождения через поверхность раздела “земля-воздух” крайне затруднен. Вектор Умова-Пойнтинга,  $\vec{P} = [\vec{E} * \vec{H}]$ , где  $\vec{E}, \vec{H}$  – напряженности электрического и магнитного полей, соответственно, определяет величину мощности, переносимой через единицу поверхности, перпендикулярной вектору, а также направление переноса. В этом случае, из-за значительно более высокой в сравнении с воздухом проводимости земли, вектор Умова-Пойнтинга будет всегда направлен в сторону земной поверхности. По этой причине надежная регистрация ЕЭМИ литосферного происхождения измерительными системами с антеннами, расположенными над поверхностью земли, крайне затруднена, и для достижения требуемой эффективности измерений целесообразно применение подземных антенн.

### Результаты измерений уровня электромагнитной эмиссии в период подготовки и реализации Симуширских землетрясений

На предыдущих этапах исследований основной акцент делался на исследовании выявленного ранее эффекта модулирующего воздействия естественного электромагнитного излучения на интенсивность геоакустической эмиссии горных пород в условиях их естественного залегания [2, 3]. В рамках данной работы исследовались закономерности изменений минимальных (фоновых) регистрируемых уровней ЕЭМИ и ГАЭ (рис. 3).

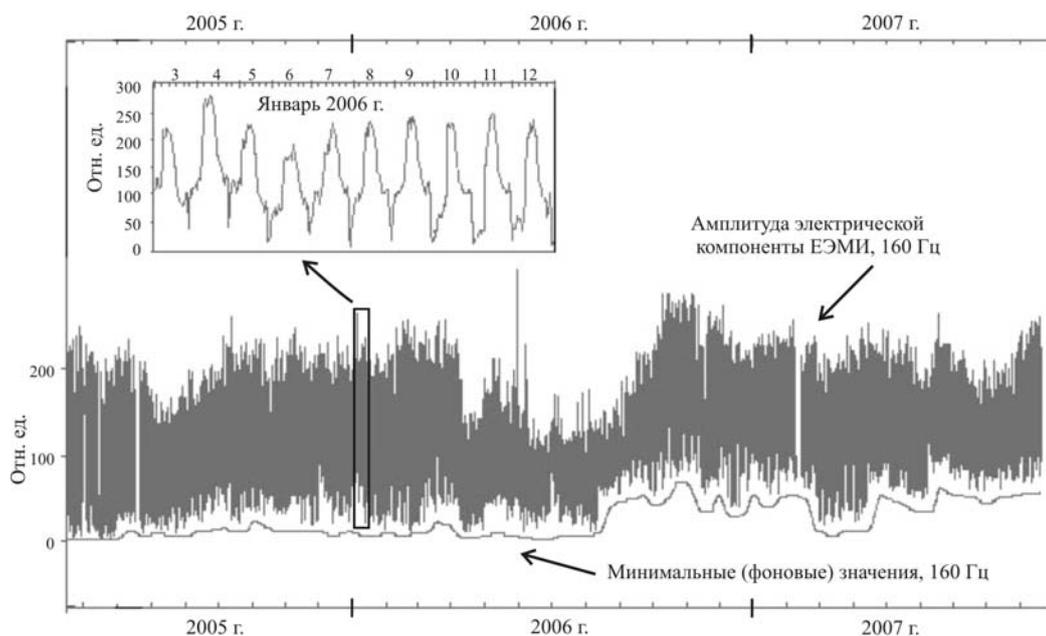


Рис. 3. Иллюстрация к методике выделения минимальных (фоновых) уровней ЕЭМИ.

При этом имелось в виду, что при достаточно низких уровнях собственных шумов измерительных трактов и внешних помех, измеряемые значения минимальных уровней ЕЭМИ и ГАЭ будут определяться, прежде всего, интенсивностями электромагнитной и геоакустической эмиссий горных пород, окружающих скважину. Выделение минимального уровня ЕЭМИ проводилось путем программной фильтрации временных рядов ЕЭМИ с использованием фильтра MinMax, встроенного в пакет специализированных программ ABD, предназначенный для обработки временных рядов [4]. Обработка временных рядов с помощью указанного фильтра заключалась в вычислении минимальных значений ряда в заданном скользящем окне. Ширина окна составляла несколько суток, что позволяло сгладить суточные вариации уровней ЕЭМИ. Рассчитанные подобным образом ряды далее проходили процедуру дополнительного сглаживания в скользящем окне шириной около 16 суток.

На рис. 4 (а - г) представлены результаты измерений минимальных уровней ЕЭМИ в скважине Г-1 на временном интервале июль 2005 г. – апрель 2007 г. во всем используемом частотном диапазоне от 30 Гц до 1200 Гц. На рис. 4 (д) приведены данные, отражающие изменения сейсмической активности в зоне радиуса  $R = 100$  км от скважины Г-1 по критерию  $S = \frac{L_p}{R_h}$ , где  $L_p = 10^{0,44M - 1,29}$  – длина очага землетрясения

[5];  $R_h$  – гипоцентральное расстояние (для расчета параметра  $S$  использованы данные из каталога Камчатского филиала геофизической службы (КФГС) РАН).

Как следует из представленных данных, на временном интервале август 2006 г.- февраль 2007 г. во всех частотных полосах были зарегистрированы аномальные (более 30 дБ на частоте 160 Гц) бухтообразные изменения минимального уровня ЕЭМИ. Отмеченные аномалии по времени приурочены к катастрофическим Симуширским землетрясениям, произошедших восточнее острова Симушир (Средние Курилы) 15 ноября 2006 г. и 13 января 2007 г.

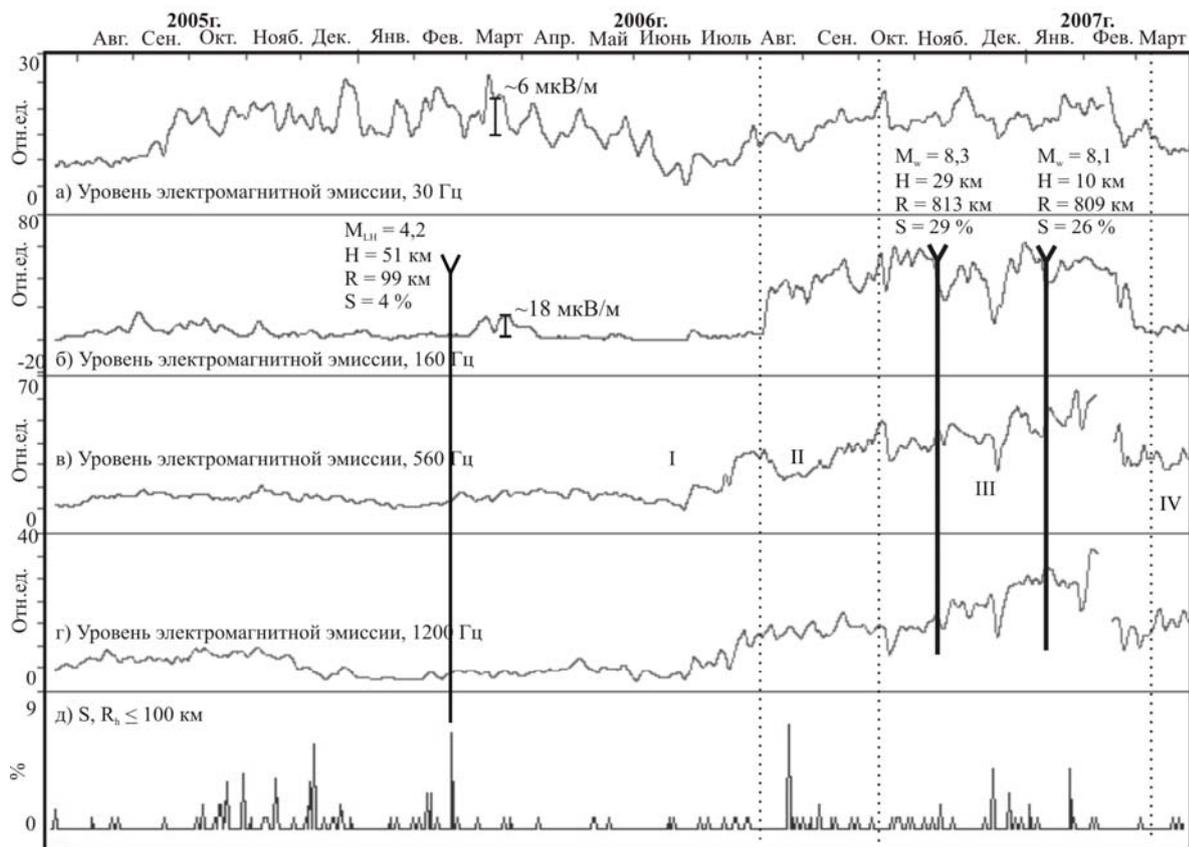


Рис. 4. Результаты измерений минимальных уровней ЕЭМИ на временном интервале август 2005 г.- март 2007 г.

Координаты эпицентра главного толчка первого землетрясения:  $\varphi = 46.6^\circ$  с.ш.,  $\lambda = 153.2^\circ$  в.д. По данным Сейсмологического центра Гарвардского университета (США) магнитуда землетрясения  $M_w$  составила 8.3. Координаты эпицентра главного толчка второго землетрясения:  $\varphi = 46.29^\circ$  с.ш.,  $\lambda = 154.49^\circ$  в.д., магнитуда по данным того же центра -  $M_w = 8.1$ . По данным службы NEIC (США) глубина первого Симуширского землетрясения составили 29 км, второго – 10 км. На рис. 5 приведены положения эпицентров главных толчков Симуширских землетрясений, а также их афтершоков, зарегистрированных в течение первых суток после основных событий.

Для обоих сейсмических процессов в районе острова Симушир наибольшая афтершоковая активность наблюдалась в течение первых суток, после чего отмечался ее значительный спад. По данным каталога NEIC в ходе разрядки напряжений в очаговой области первого события и вне ее в течение суток возникло 203 толчка с  $M \geq 4.5$ , а в очаге второго землетрясения – 70. Занимаемая афтершоками площадь (рис. 5) дает представление о размерах очагов Симуширских землетрясений.

Указанные землетрясения явились самыми сильными сейсмическими событиями за все время измерений ЕЭМИ на пункте Г-1 как по магнитудам, так и по

критерию  $S = \frac{L_p}{R_H}$ .

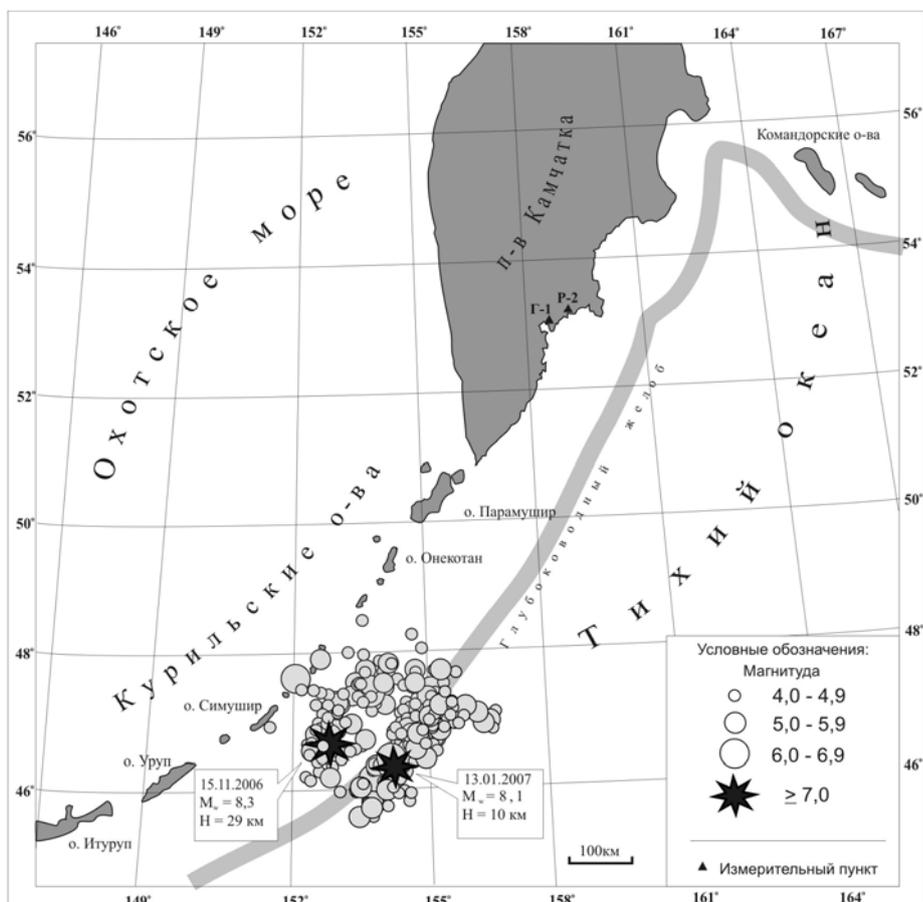


Рис. 5. Положения эпицентров главных толчков Симуширских землетрясений (звездочки) и их афтершоков с  $M \geq 4.5$  (кружки), зарегистрированных в течение первых суток после основных событий (данные каталога NEIC). Узкая полоса – ось глубоководного желоба.

### Обсуждение результатов

Исходя из особенностей результатов измерений, интервал июль 2005 г. – апрель 2007 г. условно можно разделить на четыре стадии (рис. 4). В рамках данной работы анализировались закономерности измерений уровня ЕЭМИ на стадии I, для которой были характерны относительно небольшие амплитуды вариаций минимальных значений уровня ЕЭМИ в диапазонах 160 Гц, 560 Гц и 1200 Гц. Из данных, представленных на рис. 4, можно видеть, что наибольшие амплитуды вариаций уровня ЕЭМИ на стадии I относятся к наиболее низкочастотной полосе 30 Гц. Сравнение этих данных с данными по сейсмической активности по параметру  $S = \frac{L_p}{R_H}$  (рис. 4д)

позволяет говорить о том, что наиболее вероятной причиной вариаций уровня ЕЭМИ на стадии I являлись процессы, связанные со слабыми сейсмическими событиями в зоне радиуса 100 км от пункта Г-1. В свою очередь, наиболее вероятной первопричиной указанных локальных землетрясений могло быть постепенное нарастание напряжений и деформаций в геосреде на заключительном этапе подготовки Симуширских землетрясений, вплоть до критического уровня в начале стадии II (август 2006 г.).

Основная задача, поставленная в рамках данной работы, заключалась в выборе физико-математической модели процессов генерации электромагнитной эмиссии в горной среде, в наибольшей степени согласующейся с результатами натурных измерений на стадии I. Для этой цели анализировалась аномалия минимального уровня

ЕЭМИ, зарегистрированная на временном интервале 27.02 – 28.03. 2006 г. Выбор для анализа именно этого интервала был обусловлен тем, что в этом случае аномалию ЕЭМИ на канале 160 Гц достаточно уверенно можно связать с процессами в зоне очага землетрясения, произошедшего 18.02.2006 г. в районе Авачинского залива ( $M_{LN} = 4.2$ , эпицентральное расстояние  $r = 85$  км, глубина очага  $h = 51$  км). Исходя из указанного предположения, для расчетов значений напряженности электрического поля в районе пункта Г-1 была использована модель генерации электромагнитных возмущений, представленная в [6].

В качестве источников ЕЭМИ данная модель рассматривает процессы трещинообразования, позволяя проводить расчеты как для трещин сдвига, так и трещин отрыва. Особенностью модели является учет эффекта “когерентного” усиления микрополей при суммировании фронтовых частей электромагнитных сигналов отдельных трещин. Указанная модель предполагает проводить оценку величины напряженности электрического поля для двух диапазонов расстояний: так называемых диффузионной и акустической зон. Эти зоны характеризуются различными режимами распространения электромагнитных возмущений. В диффузионной зоне фронт электромагнитного излучения распространяется посредством диффузионного процесса, где в качестве коэффициента диффузии электромагнитных возмущений выступает величина  $D = \frac{1}{\mu_0 \sigma}$ . Размер области, охваченной диффузией, увеличивается со

временем по закону  $r_d = 2\sqrt{Dt}$ . В начальные моменты после трещинообразования

характерная величина скорости диффузионных процессов,  $\frac{dr_d}{dt} \sim \sqrt{\frac{D}{t}}$ , много больше

скорости акустической волны. На критическом расстоянии  $r^*$  акустическая волна догоняет диффузионный фронт и опережает его: далее начинается акустическая зона.

Это событие происходит в момент времени  $t^* = \frac{4D}{C_1^2}$ , где  $C_1 = 5000$  м/с - скорость

продольной упругой волны. Критический радиус  $r^*$  вычисляется с учетом

электромагнитных параметров среды, главным образом, проводимости:  $r^* = \frac{4}{\mu_0 \sigma C_1}$ .

На второй стадии процесса распространения ЕЭМИ при  $t > t^*$  электромагнитные возмущения в основном локализуются в окрестности фронта упругой волны. Они движутся вместе с акустической волной со скоростью  $C_1$  в квазистационарном режиме. На этой стадии упругой волне предшествует квазистационарный электромагнитный

предвестник с характерным масштабом  $\lambda = \frac{D}{C_1}$ . Для значения  $\sigma = 10^{-2}$  См/м,

характерного для средневлажной земли, радиус  $r^*$  составляет 64 км. В этой связи, для вышеуказанного сейсмического события с эпицентральным расстоянием 85 км расчет проводился по формулам для акустической зоны. Для расчетов использовался вариант модели с трещинами отрыва.

Введем следующие обозначения:  $V$  – объем очаговой зоны ( $V = 4.48 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup>, по расчетам согласно [5]);  $dV'$  – элементарный объем очаговой зоны,  $r = 85$  км – эпицентральное расстояние;  $h = 51$  км – глубина очага землетрясения;  $I = -14^\circ$  – угол

магнитного склонения;  $B_0 = 5 \cdot 10^{-5}$  Тл – вектор индукции геомагнитного поля;  $\theta = \frac{\pi}{4}$  –

угол между осью  $z_1$ , параллельной вектору  $B_0$ , и направлением на очаг землетрясения из точки приема;  $m = 0.5$  – отношение скоростей поперечной и продольной упругих

волн;  $v_c = 1000$  м/с - скорость роста дисковидных трещин отрыва;  $T \sim 10^5$  - характерный временной масштаб землетрясения.

Для вычисления искомого значения вертикальной компоненты напряженности электрического поля в акустической зоне с помощью выбранной модели были выполнены следующие действия:

1) Определена функция напряженности электрического поля в сферической системе координат для одной дисковидной трещины отрыва радиуса  $a$ , с учетом коэффициента экспоненциального затухания, в который входит параметр  $\lambda$ :

$$E_\varphi = \frac{B_0 a C_1^2 v_1 3\tau_1^2 \sin \theta}{2\lambda r^2} e^{-\frac{(r-C_1 t)}{\lambda}} \quad (3)$$

Здесь  $\tau_1 \approx \frac{2a}{v_c}$  - время раскрытия трещин,  $v_1 \approx \frac{\Delta a}{\tau_1}$  - скорость раздвижения стенок трещин,  $\Delta a \sim 0.01a$  - полуширина трещины.

2) Для вычисления напряженности, создаваемой ансамблем трещин, вводятся функции текущей и предельной концентраций трещин -  $n(t)$  и  $n_*(t)$ , соответственно, которые оцениваются через радиус дисковидной трещины  $a$ ,  $n_*(t) = \frac{1}{a^3}$ .

Оценка числа трещин, дающих “когерентный” вклад в поле, в течение промежутка времени  $t = \frac{r}{C_1}$ , проводится следующим образом:

$$N \sim \left[ n(t) - n\left(t - \frac{r}{C_1}\right) \right] V \approx \frac{dn}{dt} \frac{rV}{C_1} \sim \frac{n_* rV}{TC_1} \quad (4)$$

С помощью подобной оценки можно вывести формулу для компоненты напряженности электрического поля в сферической системе координат для ансамбля трещин:

$$E_\varphi = \frac{3B_0 V n_* a^2 \Delta a C_1}{r \lambda v_c T} \quad (5)$$

После перевода в декартову систему координат, с использованием следующих формул:

$$x = y = \frac{\sqrt{2}}{2} r, \quad \rho = \frac{\sqrt{2}}{2} R, \quad R = \sqrt{x^2 + y^2 + h^2} \quad (6),$$

можно получить необходимую вертикальную компоненту электрического поля:

$$E_z = E_\varphi y \cos \frac{1}{\rho}, \quad \theta = \frac{\pi}{4} \quad (7)$$

После подстановки в формулу (7) всех необходимых значений параметров теоретическое значение вертикальной компоненты напряженности электрического поля в акустической зоне на эпицентральной расстоянии  $r = 85$  км составило  $E_z = 15$  мкВ/м. Сравнение указанного значения  $E_z$  с данными натурных измерений на пункте Г-1 на том же самом временном интервале показало высокую степень сходимости результатов: измеренное значение вертикальной компоненты напряженности электрического поля для частоты 30 Гц составило  $E_z = 6$  мкВ/м, для частоты 160 Гц -  $E_z = 18$  мкВ/м (рис. 4).

### Основные выводы

1. Заключительный период подготовки и реализации катастрофических Симуширских землетрясений 2006 и 2007 гг. сопровождался значительными

бухтообразными изменениями уровня электромагнитной эмиссии во всех использованных частотных диапазонах (30 Гц, 160 Гц, 560 Гц, 1200 Гц).

2. Изменения минимального уровня ЕЭМИ, возникшие после землетрясения, произошедшего 18.02.2006 г. в районе Авачинского залива ( $M_{LH} = 4.2$ , эпицентрального расстояние  $r = 85$  км, глубина очага  $h = 51$  км), хорошо согласуются с моделью В.В. Суркова для ансамбля трещин отрыва.

3. Полученные результаты указывают на высокую чувствительность системы с подземной электрической антенной к изменениям уровня ЕЭМИ литосферного происхождения.

#### Список литературы

1. Власов Ю.А., Гаврилов В.А., Денисенко В.П., Федористов О.В. Телеметрическая система сети комплексного геофизического мониторинга // Сейсмические приборы. М.: ОИФЗ РАН. 2008. Вып. 44. С. 33-38.
2. Гаврилов В.А. Физические причины суточных вариаций уровня геоакустической эмиссии // ДАН. 2007. Т. 414, № 3. С. 389-392.
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. Децерековский А.В., Журавлев В.И. Анализ временных рядов с программой ABD. М.: ОИФЗ РАН. 1997. 80 с.
5. Ризниченко Ю.В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Исследования по физике очага землетрясений. М.: Наука. 1976. С. 9-27.
6. Сурков В.В. Электромагнитные эффекты при землетрясениях и взрывах. М.: МГИФИ (ТУ). 2000. 230 с.

#### MEASUREMENTS OF THE ELECTROMAGNETIC VLF RADIATION FROM THE 2006-2007 CATASTROPHIC EARTHQUAKES AT SIMUSHIR ISLAND

V.A. Gavrilov, E.V. Poltavtseva

*The Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, 683006, Petropavlovsk-Kamchatsky, e-mail: [vgavr@kscnet.ru](mailto:vgavr@kscnet.ru)*

The paper provides data from measurements of natural electromagnetic emission (NEME) in the VLF frequency range observed at the final stage of the build-up phase and real-time detection of the 2006-2007 catastrophic earthquakes at Simushir Island. The measurements were performed using the underground vertical electric antenna of the innovative configuration. Changes in the minimum NEME level emerged after the February 18, 2006 earthquake in the Avacha Gulf ( $M_{LH} = 4.2$ , the distance of the epicenter  $r=85$  km and the focal depth  $h=51$  km) agree completely with a selected model for a complex of ruptures. The data indicate that the underground antenna system responses rapidly to changes in the NEME level of the lithospheric origin.