

Применение подземных электрических антенн в системе мониторинга напряженно-деформированного состояния геосреды

ГАВРИЛОВ В.А., БУСС Ю.Ю., ПОЛТАВЦЕВА Е.В.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Россия

vgavr@kscnet.ru

Электромагнитные измерения с подземными электрическими антennами проводятся на территории Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона с 2003 г. в комплексе со скважинными геоакустическими и другими видами измерений. По состоянию на май 2013 г. сеть измерений состоит из четырех радиотелеметрических пунктов, созданных на базе скважин Г-1, Р-2, Е-1, К-33, и Центра сбора и обработки информации, расположенного в здании ИВиС ДВО РАН. Проводимые измерения ориентированы на задачи мониторинга напряженно-деформированного состояния геосреды и прогноза сейсмической опасности. Для измерений применяются подземные вертикальные электрические антенны трех разных конструкций. Выбор конкретного типа антенн определяется особенностями, связанными с местом расположения скважины (городская территория, лесной массив и т.п.), уровнем электромагнитного излучения (ЭМИ) в районе скважины и конструкцией скважины. В рамках решаемых задач электромагнитные измерения используются в нескольких приложениях, в том числе, для оценки изменений удельной электропроводности горных пород, окружающих скважину. Принципиальная возможность таких оценок обеспечивается применением подземных антенн, где в качестве основного элемента используются *неизолированные* от геосреды обсадные трубы скважин. В этом случае имеет место сильная зависимость уровня сигнала на выходе антенн от электрофизических параметров окружающей геосреды, что и позволяет использовать антенну такого типа для мониторинга изменений электропроводности горных пород. Для плоской электромагнитной волны, распространяющейся в полупроводящей геосреде затухание амплитуд напряженностей электрического и магнитного полей будет определяться множителем $e^{-\alpha}$, где α - коэффициент затухания. Зависимость коэффициента затухания от параметров окружающей геосреды будет определяться выражением [1]:

$$\alpha = \omega \sqrt{0.5 \mu_a \varepsilon_a \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \varepsilon_a^2}} - 1 \right)}, \quad (1)$$

где σ - удельная электропроводность, ε_a - абсолютная диэлектрическая проницаемость геосреды, μ_a - абсолютная магнитная проницаемость среды, ω - круговая частота.

Для невысоких значений частот, в том числе, для частот порядка сотен Гц, когда $\frac{\sigma^2}{\omega^2 \varepsilon_a^2} \gg 1$, выражение (1) упрощается, и изменения величины коэффициента затухания будут определяться только значениями удельной электропроводности геосреды:

$$\alpha \approx \sqrt{0.5 \omega \mu_a \sigma} \quad (2)$$

В общем случае характер зависимости электропроводности от флюидонасыщенности пород определяется типом породы, пористостью, степенью минерализации флюида и проницаемостью. Наиболее резко зависимость удельной электропроводности σ от флюидонасыщенности горных пород оказывается при значениях влажности, не превышающих 4%. Как показано в [2, 3], в большинстве случаев изменение флюидонасыщенности (влажности) горных пород в пределах десятых долей процента приводит к изменениям удельного

сопротивления на порядок и выше. Так, например, для базальта уменьшение влажности с 0.49% до 0.26% приводит к увеличению удельного сопротивления с $9.0 \cdot 10^7$ Ом·см до $3.1 \cdot 10^9$ Ом·см. Для алевролита уменьшение влажности с 0.54% до 0.44% приводит к увеличению удельного сопротивления с $1.5 \cdot 10^6$ Ом·см до $8.4 \cdot 10^8$ Ом·см, т.е. примерно в 500 раз. Согласно (2) коэффициент затухания при этом изменится в 22 раза. Таким образом, в низкочастотном диапазоне основное влияние на величину коэффициента затухания α оказывает удельная электропроводность геосреды σ при малых значениях флюидонасыщенности горных пород. В этом случае, контроль изменений уровня ЭМИ на выходе подземной электрической антенны позволяет оценивать изменения удельной электропроводности геосреды. С учетом степенной зависимости затухания амплитуд напряженностей электромагнитного поля от коэффициента α даже незначительные изменения флюидонасыщенности геосреды, связанные с подготовкой землетрясений, будут приводить к существенным изменениям уровня сигнала на выходе подземной электрической антенны, т.е. будут отражать изменения удельной электропроводности геосреды с очень высоким коэффициентом чувствительности.

К настоящему времени вопросы, связанные с использованием подземных электрических антенн для мониторинга удельного электрического сопротивления геосреды, наиболее детально проработаны для измерений на пункте (скважине) Г-1. Электромагнитная обстановка в районе указанной скважины определяется, в основном, ЭМИ техногенного происхождения. В рамках задач, связанных с мониторингом электропроводности горных пород, измерения на скважине проводились в трех полосах частот, выделяемых третьоктавными полосовыми фильтрами с центральными частотами 160 Гц, 560 Гц и 1200 Гц.

Начало стабильных электромагнитных измерений с подземной электрической антенной на скважине Г-1 относится к июлю 2005 г. По причинам технического и организационного характера ряды указанных измерений имели пропуски с июня 2009 г. по июль 2010 г. Результаты измерений показывают, что все относительно сильные события глубиной до 150 км, выбранные по критерию $S = L_p/R_h \geq 16\%$, где $L_p = 10^{0.44M-1.29}$ – длина очага землетрясения [4], R_h – гипоцентральное расстояние, сопровождались значительными аномалиями уровня фонового ЭМИ (рис. 1). Так, например, во временной окрестности Симуширских землетрясений 2006 – 2007 гг. ($M = 8.3$ и 8.1) величина аномалии составила около 550%. С мегаземлетрясением ($M = 9.0$) в районе Тохоку, Япония, произошедшего 11 марта 2011 г. на эпицентральном расстоянии $R = 2049$ км, связана аномалия фонового ЭМИ порядка 350%. Наиболее значительной за все время измерений явилась аномалия фонового ЭМИ во временной окрестности землетрясения с магнитудой $M = 6.9$, произошедшего 28 февраля 2013 г. у южной оконечности Камчатки на эпицентральном расстоянии 251 км на глубине 52 км. В этом случае в сравнении со значениями в сентябре 2012 г. уровень фонового уровня ЭМИ в диапазоне (147 – 186) Гц в январе 2013 г. вырос примерно в 6.5 раз.

Следует подчеркнуть, что для получения корректных результатов необходима достаточная времененная стабильность воздействующего на геосреду внешнего ЭМИ. Результаты измерений, проведенные в периоды отключений подстанции, обеспечивающей электропитанием район расположения скважины Г-1, показывают, что при штатном режиме работы промышленной электросети примерно 98% от общего уровня фонового ЭМИ на частотах в окрестности 150 Гц составляет электромагнитное излучение, связанное с работой указанной подстанции. В этой связи стабильность фонового ЭМИ в районе скважины Г-1 в определенной мере можно оценить исходя из данных об изменениях токовой нагрузки для территории, прилегающей к скважине Г-1. Сопоставление таких данных с данными измерений фоновой составляющей ЭМИ в окрестности частоты 150 Гц за период 2007 -2012 гг. показал, что значимые изменения уровня фоновой составляющей ЭМИ не могут быть обусловлены изменениями значений токовой нагрузки промышленной электросети.

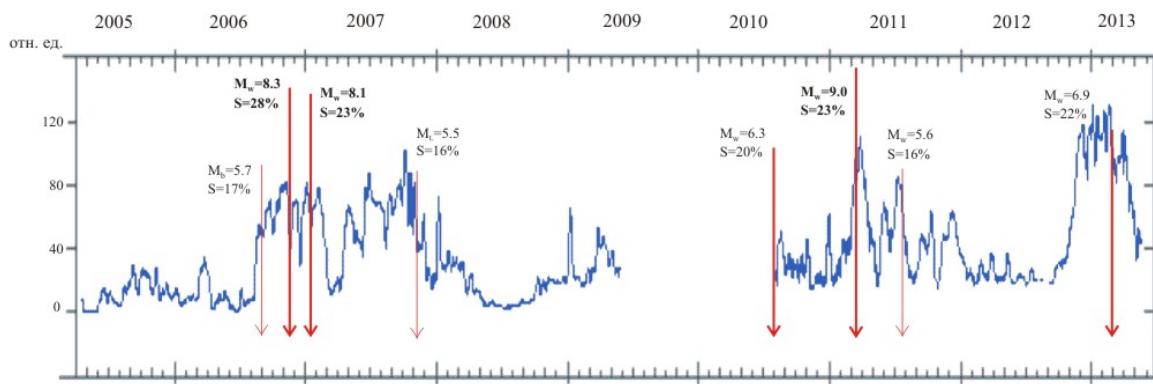


Рис. 1. Изменения фонового уровня ЭМИ по результатам измерений в полосе со средней частотой 160 Гц.

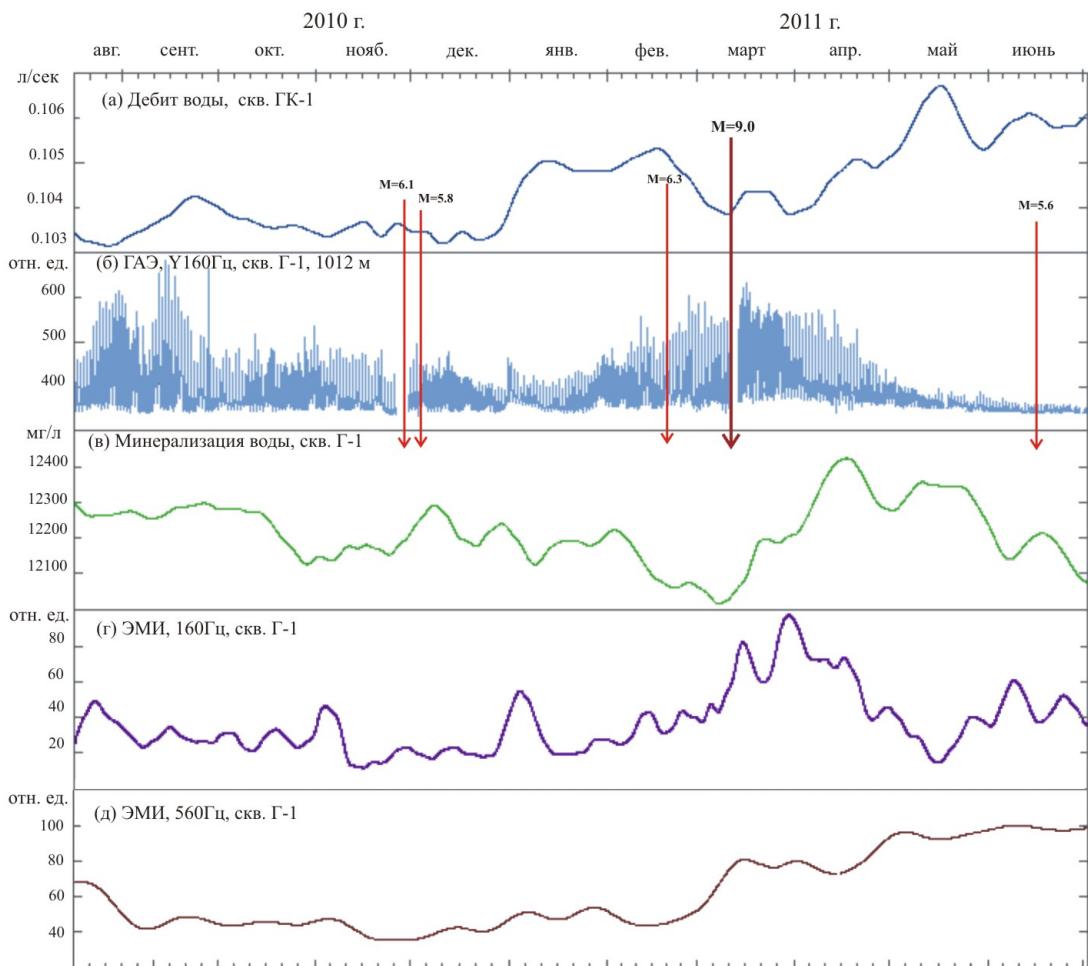


Рис. 2. Вариации дебита воды скважины ГК-1 (а), среднеквадратические значения геоакустической эмиссии (ГАЭ) на глубине 1012 м (б), минерализации воды скважины Г-1 (в) и фоновых значений ЭМИ (г, д) во временной окрестности мегаземлетрясения в районе Тохоку (Япония) [5]

Важно отметить согласованность результатов измерений фонового уровня ЭМИ, отражающих подготовку сильных землетрясений, с данными по другим видам измерений. В качестве примера на рис. 2 представлены результаты комплексных скважинных измерений для временной окрестности мегаземлетрясения в районе Тохоку (Япония) [5]. Согласно данным измерений фонового уровня ЭМИ в третьоктавных полосах с центральными частотами 160 Гц (рис. 2г) и 560 Гц (рис. 2д) удельное сопротивление геосреды начало плавно увеличиваться с конца декабря 2010 г., а за 12 суток до землетрясения резко возросло практически одновременно с началом роста минерализации воды скважины Г-1. Значительное и продолжительное увеличение минерализации воды скважины Г-1 после землетрясения сопровождалось возрастанием дебита воды скважины ГК-1, а также постепенным уменьшением амплитуд суточных вариаций уровня геоакустической эмиссии до экстремально низких значений. Такой характер данных, как показано в [5], свидетельствует об интенсификации на этом этапе процессов выжимания флюида из горных пород вследствие увеличения уровня сжимающих напряжений. Следует подчеркнуть разницу в характеристиках изменений фонового уровня ЭМИ в разных полосах частот (см. рис. 2г и рис. 2д). Можно предположить, что более сложный характер изменений фонового уровня ЭМИ в полосе с центральной частотой 160 Гц связан, в первую очередь, с тем, что в указанной полосе частот значения коэффициента затухания α согласно (2) примерно вдвое меньше значений для частот порядка 560 Гц. По этой причине результаты измерений уровня ЭМИ в полосе с центральной частотой 160 Гц отражают изменения удельного сопротивления горных пород для более глубоких горизонтов геосреды. Кроме этого, для частот порядка 140 - 160 Гц электрическая длина антennы на базе скважины Г-1 близка к резонансной длине, что приводит к значительному повышению чувствительности системы измерений в этом диапазоне частот. Приведенный пример указывает на эффективность использованного метода непрерывного мониторинга удельного сопротивления горных пород для оценок изменений напряженно-деформированного состояния геосреды, а также на согласованность получаемых при этом результатов с данными по другим видам геофизических измерений.

Литература

1. Красюк Н.П., Дымович Н.Д. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Высшая школа. – 1974. – 536 с.
2. Пархоменко Э.И. Электрические свойства горных пород. М.: Наука. – 1965. – 164 с.
3. Пархоменко Э.И., Бондаренко А.Т. Влияние одностороннего давления на электрическое сопротивление горных пород // Изв. АН. СССР, серия геофиз. – 1960. – №2. – С. 326-332.
4. Ризниченко Ю.В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Исследования по физике землетрясений. – М.: Наука. – 1976. – С. 9-26.
5. 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. V. 13. ES1002, doi:10.2205/2013ES000527.

Application of underground electric antennas in the stress-stain state monitoring system of geological environment

Gavrilov V.A., Poltavtseva E.V., Booss Ju.Ju.

Since 2003 electromagnetic measurements with underground electric antenna together with borehole geoacoustic and other measurements have been carried out in Petropavlovsk-Kamchatskii geodynamical experimental field since 2003. By March 2013, the measurement network consisted of four telemetry points, based upon the boreholes G-1, R-2, E-1, K-33, and the Center for data acquisition and processing, which is located in the building of IVS FEB RAS. The measurements are focused on the tasks of monitoring of the stress-strain state of geoenvironment and prediction of seismic hazard. Currently, underground vertical electric antennas have been used in three different designs. Selection of antenna type is determined by the peculiarities associated with borehole location (such as urban area, forest etc.), electromagnetic radiation level and borehole construction. Within the tasks, electromagnetic measurements are used in several applications, in particular, to estimate the electrical conductivity changes of rocks surrounding the borehole. The principle of such estimations is provided by the application of underground antennas, where the bare from geoenvironment borehole casing pipe is used as the basic element. These results suggest high sensitivity of the developed monitoring method for the rock electrical conductivity changes and the consistency of the obtained results with the data of other measurements.