

Скважинные геоакустические измерения в системе комплексного геофизического мониторинга и прогноза землетрясений на Камчатке

В. А. Гаврилов,* Ю. Ю. Бусс, Ю. В. Морозова, Е. В. Полтавцева

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

Россия, 683006, Петропавловск-Камчатский, б-р Пийпа, д. 9

(Статья поступила 29.06.2017; Подписана в печать 12.09.2017)

Дается оценка результатам, полученным в ходе многолетнего использования новых методов мониторинга напряженно-деформированного состояния геосреды в зоне Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона. Методы базируются на данных скважинных геоакустических измерений и электромагнитных измерений с подземными электрическими антеннами. На основе результатов мониторинга с привлечением данных гидрогеохимических и гидрогеодинамических измерений каждые две недели осуществляется подготовка заключений о сейсмической опасности для Камчатского края. Приведен пример данных комплексных скважинных измерений, характеризующих изменения напряженно-деформированного состояния геосреды в зоне Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона во временных окрестностях Тохокского мегаземлетрясения ($M=9.0$, Япония, март 2011 г.) и сильнеешего Жупановского землетрясения ($M=7.2$, Камчатка, январь 2016 г.).

PACS: 93.00.00

УДК: 550.348

Ключевые слова: геоакустическая эмиссия, скважина, мониторинг геосреды.

ВВЕДЕНИЕ

В ходе многолетних исследований на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне получило развитие прикладное направление работ, связанное с разработкой новых методов непрерывного мониторинга напряженно-деформированного состояния геосреды, базирующихся на данных скважинных геоакустических измерений и электромагнитных измерений с подземными электрическими антеннами. Ряд успешных прогнозов сильных камчатских землетрясений, сделанных по данным указанных видов измерений, показали перспективность этого направления исследований для целей среднесрочного и краткосрочного прогноза землетрясений [1, 2]. Создание в районе г. Петропавловска-Камчатского непрерывно функционирующей телеметрической сети комплексных скважинных измерений с достаточно большим числом измерительных каналов, а также развитие методов мониторинга напряженно-деформированного состояния геосреды, послужили необходимой основой для организации в январе 2014 г. в Институте вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН службы оперативной обработки данных сети скважинных измерений. Одной из основных задач службы является подготовка регулярных (в обычном режиме – каждые две недели) заключений о сейсмической опасности для Камчатского края.

1. СЕТЬ КОМПЛЕКСНЫХ СКВАЖИННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПЕТРОПАВЛОВСК-КАМЧАТСКОГО ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ПОЛИГОНА

Скважинные геоакустические измерения проводятся на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне с 2000 г. по настоящее время, постоянно развиваясь в техническом и методическом планах. На текущий момент автоматизированная сеть комплексных скважинных измерений включает в себя четыре непрерывно функционирующих радиотелеметрических пункта, созданных на базе измерительных скважин, расположенных на территории Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона, а также Центра сбора и обработки информации ИВиС ДВО РАН. На всех скважинах в качестве основных проводятся два вида непрерывных наблюдений: геоакустические измерения скважинными геофонами и гидрофонами и электромагнитные измерения с помощью подземных электрических антенн. Измерения проводятся в четырех полосах частотного диапазона (5–1300) Гц, глубина погружения геофонов и гидрофонов составляет от 210 м до 1012 м. Данные измерений ежедневно анализируются дежурным оператором-экспертом в Центре сбора и обработки информации и являются информационной основой для подготовки регулярных заключений о текущей сейсмической опасности для территории Камчатского края.

2. МОНИТОРИНГ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГЕОСРЕДЫ НА БАЗЕ КОМПЛЕКСНЫХ СКВАЖИННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

2.1. Геоакустические скважинные измерения. Эффект модуляции интенсивности геоакустической эмиссии переменным электрическим полем

Наиболее интересным и важным в прикладном плане научным результатом, полученным в ходе комплексных скважинных измерений на Петропавловск-

*E-mail: vgavr@kscnet.ru

Камчатском геодинамическом полигоне, является явление эффекта модуляции интенсивности геоакустической эмиссии (ГЭ) переменным электрическим полем. Указанный эффект выражается в откликах ГЭ, регистрируемой при скважинных измерениях, на изменения амплитуды напряженности внешнего переменного электрического поля, воздействующего на геосреду в зоне измерительной скважины. В этом случае, например, суточные вариации амплитуды напряженности электрического поля при достаточно высокой влагонасыщенности геосреды будут вызывать соответствующие суточные вариации среднеквадратических значений ГЭ. При этом амплитуда откликов ГЭ будет меняться при изменениях влагонасыщенности геосреды, связанных с подготовкой и реализацией землетрясений. Предполагаемый механизм указанного эффекта изложен в [3].

2.2. Электромагнитные измерения с подземными антеннами

Для электромагнитных измерений на всех пунктах наблюдений используются подземные вертикальные электрические антенны трех разных конструкций, основным конструктивным элементом которых являются обсадные колонны скважин. Данные электромагнитных измерений позволяют контролировать изменения амплитуд вариаций ЭМИ, воздействующего на геосреду в зоне скважины, и при необходимости учитывать эти изменения при обработке данных об откликах ГЭ. Особо следует отметить использование данных электромагнитных измерений для непрерывного мониторинга изменений удельного сопротивления горных пород в зоне скважины, что позволяет оценивать изменения влагонасыщенности геосреды в зонах измерительных скважин, причиной которых являются процессы сжатия-растяжения горных пород. Физическая основа разработанного для этой цели метода изложена в [4].

3. ПРИМЕРЫ РЕЗУЛЬТАТОВ ГЕОАКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГЕОСРЕДЫ ВО ВРЕМЕННЫХ ОКРЕСТНОСТЯХ СИЛЬНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ

3.1. Изменения напряженно-деформированного состояния геосреды, связанные с Тохокским мегаземлетрясением

Наиболее значительные изменения напряженно-деформированного состояния геосреды в зоне Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона за все время скважинных измерений (с 2000 г.) связаны с Тохокским мегаземлетрясением ($M=9.0$, март 2011 г.). Данные геоакустических измерений в скважине Г-1 на глубине около 1000 м, показали,

что с октября 2009 г. начались значительные изменения параметров ГЭ, выразившиеся в резком уменьшении амплитуд откликов ГЭ начиная с декабря 2009 г. Сразу после Тохокского мегаземлетрясения происходило интенсивное *уменьшение амплитуд откликов ГЭ* в зоне скважины Г-1 для глубин более 700 м вплоть до их *полной деградации к июлю 2011 г.* (рис. 1).

Ряд, представленный на рис. 1,а, показывает изменения амплитуд откликов ГЭ на внешнее электромагнитное воздействие. Данные ряда, приводимого на рис. 1,б, отражают изменения скорости фильтрации жидкого флюида в шумовой зоне геофона. На рис. 1,б хорошо видна годовая периодичность скорости фильтрации, отражающая сезонные поступления влаги в шумовую зону геофона (глубины около 1000 м) из активного слоя почвы. На интервале август 2012 г.–июнь 2015 г. каждое очередное сезонное поступление влаги в порово-трещинное пространство шумовой зоны вызывает отклики более высокой амплитуды в сравнении с аналогичным предыдущим периодом (см. рис. 1,а), хотя, как показывают данные по скорости фильтрации, сезонные объемы влаги, поступающей в порово-трещинное пространство, отличаются незначительно. Таким образом, уверенный плавный рост амплитуды откликов ГЭ может объясняться только постепенным увеличением объема порово-трещинного пространства шумовой зоны и соответствующим ростом площади соприкосновения жидкой и твердой фаз.

Данные, представленные на рис. 1,а, показывают, что отправной точкой начала восстановления откликов ГЭ явился момент сильнейшего ($M_w = 7.7$) глубокого ($H = 626$ км) землетрясения с эпицентром в районе Охотского моря, произошедшего 14 августа 2012 г. на эпицентральной расстоянии около 1000 км от скважины Г-1. Указанный момент интерпретируется как начало перехода от стадии сжатия к стадии растяжения геосреды в зоне Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона.

3.2. О прогнозе Жупановского землетрясения

Сильнейшее Жупановское землетрясение произошло 30 января 2016 г. на эпицентральной расстоянии $Re=107$ км от г. Петропавловска-Камчатского. Магнитуда землетрясения составила $M_w = 7.2$ (данные USGS NEIC), глубина очага 161 км ($R_h = 193$ км). Величина параметра $S = L/R_h \times 100\%$, где L — длина очага землетрясения в км, R_h — гипоцентральной расстояние в км, составила $S = 39\%$. По величине этого параметра указанное землетрясение было самым сильным за все время скважинных измерений на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне (с 2000 г.). Землетрясение сопровождалось сотрясениями, интенсивность которых в г. Петропавловске-Камчатском составляла до шести баллов по шкале Меркалли. Проведенный в начале июля 2015 г. на-

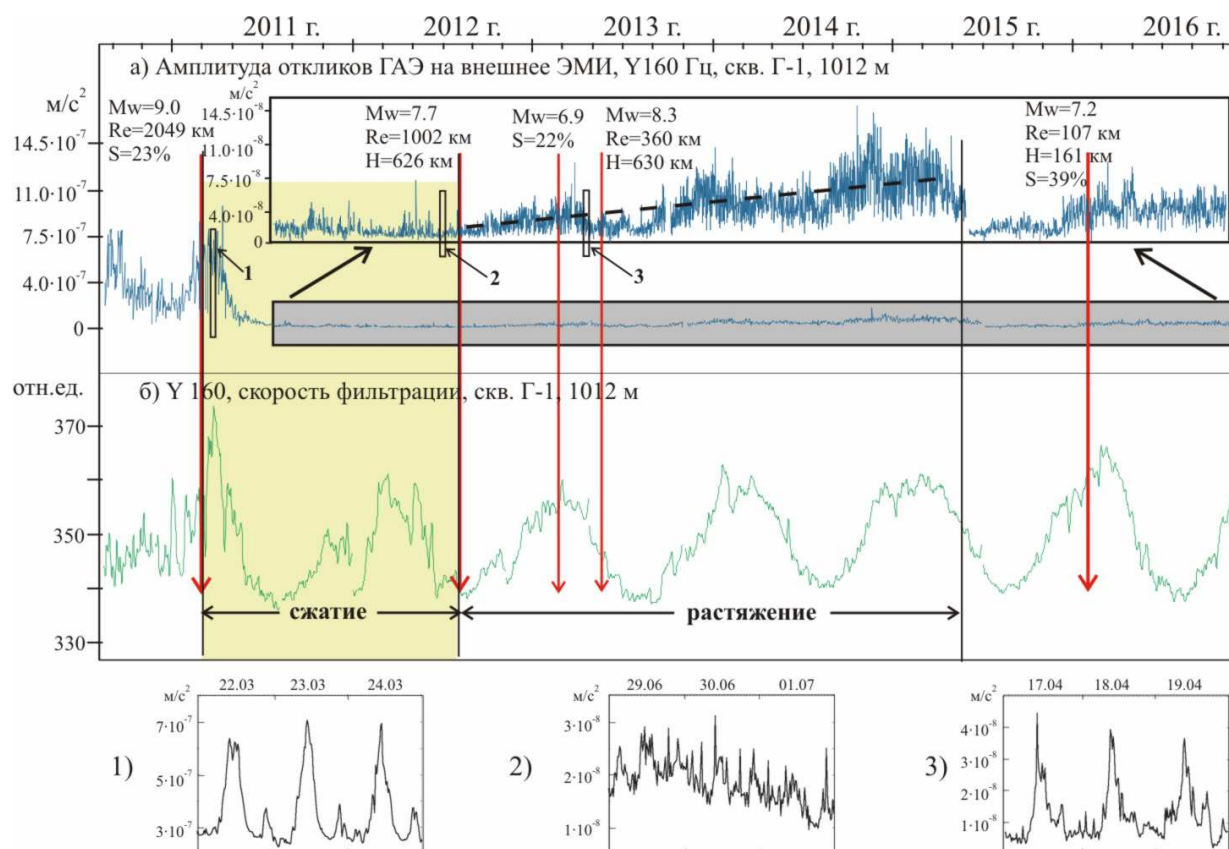


Рис. 1: Данные геоакустических измерений в зоне скважины Г-1 во временных окрестностях сильных землетрясений 2011–2016 гг.: а — амплитуда откликов ГАЭ на внешнее ЭМИ для глубины 1012 м (канал 160 Гц); б — изменения скорости фильтрации флюида в зоне скважины Г-1 для глубины 1012 м. Врезки 1–3: отклики ГАЭ для глубины 1012 м на интервале: 1 — 22–24 марта 2011 г.; 2 — 29 июня–1 июля 2012 г.; 3 — 17–19 апреля 2013 г.

турный эксперимент с откачкой воды из скважины Г-1 и результаты других измерений позволили сделать вывод о начале в июне 2015 г. интенсификации фильтрационных процессов в зоне Петропавловск–Камчатского геодинамического полигона. В этой связи в начале октября 2015 г. в заключении о сейсмической опасности для Камчатского края от 09.10.2015 г. был сделан вывод о *повышенной вероятности землетрясений* с параметром $S \geq 12\%$. Указанное заключение продлевалось вплоть до 20.01.2016 г. включительно.

За двое суток до Жупановского землетрясения (см. рис. 1, а) по результатам электромагнитных измерений был зарегистрирован аномально быстрый и значительный (примерно на 700%) рост удельного сопротивления пород в зоне скважины Г-1, означающий резкое увеличение скорости деформационных процессов в зоне Петропавловск–Камчатского геодинамического полигона. В этой связи 29 января 2016 г. в Камчатский филиал РЭС по прогнозу землетрясений было направлено Заключение о сейсмической опасности для Камчатского края, в котором было указано о *повышенной вероятности землетрясений с параметром $S \geq 12\%$* . Указанный в Заключении прогноз про-

изошедшего 30.01.2016 г. Жупановского землетрясения официально признан полностью оправдавшимся по всем параметрам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты многолетних исследований на Петропавловск–Камчатском геодинамическом полигоне указывают на высокую потенциальную эффективность методов мониторинга напряженно-деформированного состояния геосреды сейсмоактивных регионов, базирующихся на использовании эффекта модулирующего воздействия переменных электрических полей на интенсивность ГАЭ и на электромагнитных измерениях с подземными электрическими антеннами. С 2009 г. такие методы стали успешно использоваться для подготовки регулярных заключений о сейсмической опасности для Камчатского края. Следует отметить, что указанные методы могут быть адаптированы для применения и на других геодинамических полигонах.

-
- [1] Гаврилов В. А., Морозова Ю. В., Сторчеус А. В. Вулканология и сейсмология. 2006. № 1. С. 52.
[2] Гаврилов В. А., Пантелеев И. А., Рябинин Г. В. Физика Земли. 2014. № 1. С. 89.
[3] Gavrilov V. A., Naumov A. V. *Rus. J. Earth Sci.* 2017. **17**, N 1.
[4] Гаврилов В. А. Сейсмические приборы. М.: ИФЗ РАН. 2013. **49**, № 3. С. 25.

Borehole geoacoustic measurements in the system of complex geophysical monitoring and earthquakes forecast in Kamchatka

V. A. Gavrilov^a, Yu. Yu. Buss, Yu. V. Morozova, E. V. Poltavtseva

Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch, RAS

Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006, Russia

E-mail: ^avgavr@kscnet.ru

New methods of monitoring of stress-strain states of geological environment have been used for many years in the Petropavlovsk-Kamchatsky testing area. In this paper we estimate the results of using these methods. The data of borehole geoacoustic measurements and electromagnetic measurements with underground electric antennas form the basis of these methods. We analyze the results of the monitoring and compare them with the data of hydrogeochemical and hydrogeodynamic observations to make conclusions about the seismic hazard for Kamchatka region every two weeks. The complex borehole data example shows changes of stress-strain states of geological environment in the zone of the Petropavlovsk-Kamchatsky testing area in time vicinity of the Tohoku megathrust earthquake ($M=9.0$, Japan, March 2011) and the strongest Zhupanovsky earthquake ($M = 7.2$, Kamchatka, January 2016).

PACS: 93.00.00

Keywords: geophysical observations, instrumentation, and techniques.

Received 29 June 2017.

Сведения об авторах

1. Гаврилов Валерий Александрович — канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: vgavr@kscnet.ru.
 2. Бусс Юлия Юрьевна — науч. сотрудник; e-mail: julia@kscnet.ru.
 3. Морозова Юлия Валерьевна — науч. сотрудник; e-mail: morozova@kscnet.ru.
 4. Полтавцева Евгения Викторовна — науч. сотрудник; e-mail: jenya@kscnet.ru.
-