

Комплексные скважинные геофизические измерения на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне как основа для подготовки регулярных заключений о сейсмической опасности

Ю.Ю. Бусс, В.А. Гаврилов, Ю.В. Морозова

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006; e-mail: julia@kscnet.ru

В ходе комплексных скважинных измерений, проводимых на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне с 2000 года, удалось разработать ряд новых оригинальных методов непрерывного мониторинга напряженно-деформированного состояния (НДС) геосреды, перспективных для среднесрочного и краткосрочного прогноза сильных камчатских землетрясений. Разработанные методы базируются на данных непрерывно функционирующей сети измерений, состоящей к настоящему времени из пяти скважинных радиотелеметрических пунктов и Центра сбора и обработки информации, расположенного в здании ИВиС ДВО РАН. Создание указанной сети и разработка новых методов непрерывного мониторинга НДС геосреды позволили в 2014 г. в рамках группы скважинных геофизических измерений организовать службу дежурных операторов-экспертов. Такой шаг дал возможность повысить качество проводимых измерений и наладить стабильную подготовку регулярных заключений о текущей сейсмической опасности для Камчатского края. Дается оценка полученным к настоящему времени результатам, указываются на необходимость дальнейших работ по развитию сети скважинных измерений, разработке новых методов мониторинга НДС геосреды, методик анализа данных и интерпретации результатов измерений.

Камчатка входит в число самых сейсмоактивных районов мира и в этой связи чрезвычайно важен непрерывный мониторинг изменений НДС геосреды, результаты которого могут позволить своевременно идентифицировать заключительную стадию подготовки близкого сильного тектонического землетрясения. С этой целью на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне с 2000 года непрерывно развивается сеть комплексных скважинных геофизических измерений. В том числе, идет опробование новых видов измерений, методик измерений, методов обработки и анализа полученных данных. В настоящее время (март 2019 г.) сеть комплексных скважинных измерений Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона состоит из пяти радиотелеметрических пунктов (пункты на базе скважин Г-1, Р-2, ГК-1, К-33 и Е-1) и Центра сбора и обработки информации, расположенного в здании ИВиС ДВО РАН. Базовыми измерениями являются непрерывные геоакустические измерения на глубинах до 1012 м и электромагнитные измерения с подземными электрическими антеннами [2]. Кроме этого производятся непрерывные измерения удельной электропроводности, плотности, температуры и уровня воды скважин, а также ряд других измерений (рис. 1). Данные измерений по каналам сотовой связи ежедневно передаются в Центр сбора и обработки информации, где обрабатываются и анализируются дежурными операторами-экспертами. В качестве дополнительных материалов для анализа используются данные гидрогеодинамических и гидрогеохимических наблюдений, предоставляемые Камчатским филиалом Федерального исследовательского центра "Единая геофизическая служба РАН".

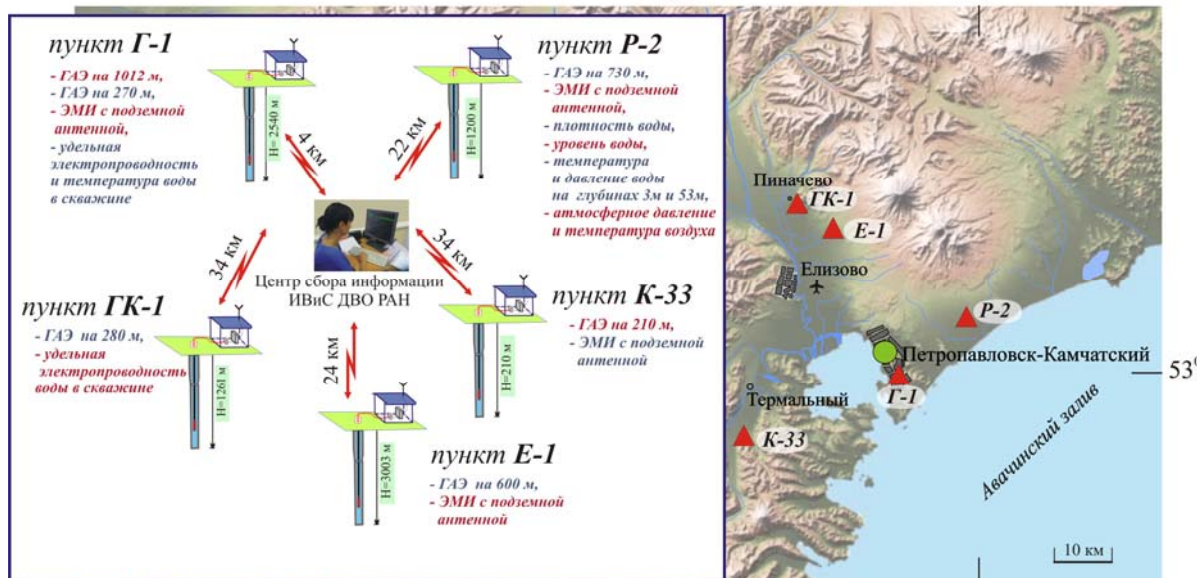


Рис. 1. Схема сети комплексных скважинных измерений Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона

Методы мониторинга напряженно–деформированного состояния геосреды

Применение разработанных авторами методов геофизического мониторинга в системах прогноза землетрясений с самого начала работ было одним из приоритетов. Тем не менее, следует подчеркнуть, что данные методы являются, в первую очередь, методами мониторинга изменений НДС, а не методами прогноза землетрясений. Однако именно данные мониторинга НДС геосреды способны обеспечить необходимую информационную основу для подготовки прогнозов землетрясений. Особого внимания заслуживают методы мониторинга, позволяющие идентифицировать заключительную стадию подготовки близких сильных землетрясений, а также способных отличать подготовку «рядовых» сейсмических событий от землетрясений, представляющих значительную потенциальную опасность.

В настоящее время для прогноза землетрясений, опасных для г. Петропавловска-Камчатского, используются, в первую очередь, два разработанных авторами метода непрерывного мониторинга НДС геосреды, позволяющие контролировать изменения влагонасыщенности геосреды значительного объема околоскважинного пространства.

Первый из указанных методов мониторинга базируется на открытом в ходе исследований на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне эффекте модуляции интенсивности геоакустической эмиссии (ГАЭ) слабым переменным электрическим полем [3, 5]. При достаточной влагонасыщенности геосреды воздействие на нее гармонического электрического поля с медленно меняющейся амплитудой напряженности будет вызывать соответствующие изменения амплитуды ГАЭ. В этом случае, например, суточные вариации амплитуды напряженности воздействующего электрического поля приведут к соответствующим суточным вариациям среднеквадратических значений (СКЗ) ГАЭ. Возможный физический механизм этого эффекта изложен в [4]. В ходе многолетних измерений на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне было установлено, что при достаточной влагонасыщенности геосреды для заключительных стадий подготовки относительно сильных землетрясений характерны значительные изменения амплитуд откликов ГАЭ на воздействие слабых переменных электромагнитных излучений (ЭМИ) в зоне скважины, связанные с изменениями влагонасыщенности геосреды.

Как показали результаты многолетних исследований, эффект изменений амплитуд откликов ГАЭ на воздействие внешнего ЭМИ (при достаточной влагонасыщенности геосреды) стабильно имеет место для землетрясений, для которых

величина $S=L_p/R_h \cdot 100, \%$, ($L_p = 10^{0.44M-1.29}$ - длина очага землетрясения в км при аппроксимировании формы очага эллипсом; M - магнитуда события, вычисленная по сейсмическому моменту; R_h - гипоцентрального расстояние в км) составляет более 5%.

Второй из основных методов непрерывного мониторинга НДС геосреды базируется на данных измерений с подземными электрическими антеннами. В этом случае контролируются изменения удельного электрического сопротивления геосреды ρ в зоне скважины. Физическая основа разработанного для этой цели метода изложена в [1]. Указанный метод характерен своей высокой тензочувствительностью и стабильностью результатов: перед всеми сильными землетрясениями с величиной $S > 20\%$ изменения параметра $\Delta\rho$, контролируемого данным методом, достигали величин от 350 % до 700%. К примеру, перед сильнейшим Жупановским землетрясением ($M=7.2$, $S=39\%$), произошедшим 30 января 2016 г. на эпицентрального расстоянии $R_e=107$ км от г. Петропавловска-Камчатского на глубине 161 км, величина $\Delta\rho$ по каналу 160 Гц за двое суток до землетрясения изменилась примерно на 700% (рис. 2).

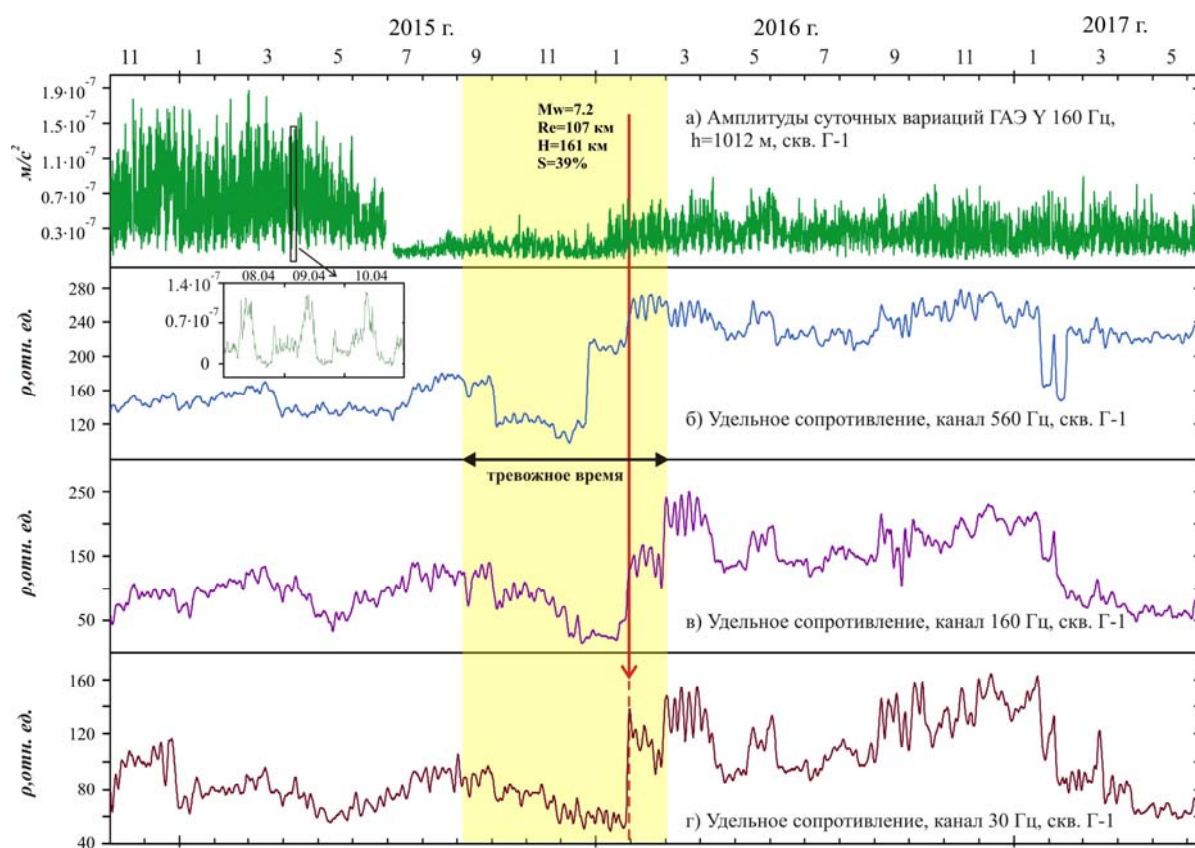


Рис. 2. Результаты геоакустических и электромагнитных измерений с подземной электрической антенной в зоне скважины Г-1 во временной окрестности Жупановского землетрясения: а) - изменения амплитуд откликов ГАЭ на внешнее электромагнитное воздействие для глубин порядка 1000 м; б) - изменения ρ для канала 560 Гц (глубина мониторинга около 400 м); в) - изменения ρ для канала 160 Гц (глубина мониторинга около 1000 м; г) - изменения ρ для канала 30 Гц (глубина мониторинга около 2250 м)

Как показывает опыт проводимых исследований, данные, получаемые сетью скважинных геофизических измерений в сочетании с результатами гидрогеодинамических и гидрогеохимических наблюдений, позволяют достаточно надежно идентифицировать стадии сжатия и растяжения геосреды в зоне Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона.

Служба дежурных операторов-экспертов

С 2014 г. задачи, связанные с получением и обработкой данных сети Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона, а также с подготовкой заключений о сейсмической опасности для территории Камчатского края, стали решаться Службой дежурных операторов-экспертов. Такая служба была организована на базе группы скважинных геофизических измерений. В обязанности дежурного оператора-эксперта входит ежедневный прием данных со всех измерительных пунктов сети Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона, их загрузка в базу данных, контроль качества функционирования аппаратуры измерительных пунктов, а также получение и обработка данных, поступающих от сторонних источников. Подготовленные данные проходят обработку по разработанным методикам, после чего характер изменений сигнала анализируется с целью выявления признаков, указывающих на повышение вероятности сильных землетрясений. Более детальный анализ данных с подготовкой заключения о сейсмической опасности для Камчатского края проводится один раз в две недели (в обычном режиме), а в экстренных случаях (при сложной сейсмической обстановке) чаще. Подготовленные заключения передаются в Камчатский филиал Российского экспертного совета (РЭС) по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска.

Пятилетний опыт работы указанной службы показал целесообразность подобного подхода при решении задач оценки сейсмической опасности. Начиная с 2013 года было сделано десять успешных прогнозов камчатских землетрясений с магнитудами от 5.4 до 7.2, включая сильнейшее Жупановское землетрясение (30.01.16 Mw=7.2, Re=107 км).

Вместе с тем, в настоящее время заключения о текущей сейсмической опасности базируются на экспертных оценках анализируемых данных дежурным оператором. В этой связи разрабатываются алгоритмы идентификации характерных стадий изменений НДС геосреды во временных окрестностях сильных камчатских землетрясений на основе анализа многомерных временных рядов данных комплексных скважинных измерений. Также ведутся работы по дальнейшему развитию сети комплексных скважинных измерений Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона, предусматривающие разработку новых методов мониторинга НДС геосреды.

Работа выполнена при поддержке Президиума ДВО РАН (грант № 18-5-095).

Список литературы

1. *Гаврилов В.А.* О методе непрерывного мониторинга удельного электрического сопротивления горных пород // Сейсмические приборы. 2013. Т. 49. № 3. С. 25-38.
2. *Гаврилов В.А., Пантелеев И.А., Рябинин Г.В.* Физическая основа эффектов электромагнитного воздействия на интенсивность геоакустических процессов // Физика Земли. 2014. № 1. С. 89-103
3. *Gavrilov V., Bogomolov L., Morozova Yu., Storcheus A.* Variations in geoacoustic emissions in a deep borehole and its correlation with seismicity // Annals of Geophysics. October/December 2008. Vol. 51. № 5/6. P. 737-753.
4. *Gavrilov V. A., Naumov A. V.* Modulation of geoacoustic emission intensity by time-varying electric field // Russian Journal of Earth Sciences. 2017. Vol.17. No. 1. : 10.2205/2017ES000591.
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. - March 2013. Vol. 13. № 1. ES1002, doi: 10.2205/2013ES000527