

## СИЛЬНЕЙШИЕ СЕЙСМИЧЕСКИЕ СОБЫТИЯ 2011 – 2013 ГГ.: ОТРАЖЕНИЕ В РЕЗУЛЬТАТАХ КОМПЛЕКСНЫХ СКВАЖИННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ПЕТРОПАВЛОВСК – КАМЧАТСКОМ ГЕОДИНАМИЧЕСКОМ ПОЛИГОНЕ

*Гаврилов В.А., Бусс Ю.Ю., Морозова Ю.В., Рябинин Г.В.*

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, vgavr@kscnet.ru*

Временной интервал 2011 - 2013 гг. примечателен наличием значительного числа сильных и очень сильных сейсмических событий. В том числе, 11.03.2011 г. имело место Тохокское мегаземлетрясение ( $M_w=9.0$ ), а также ряд более близких сильных сейсмических событий, произошедших в радиусе 1000 км от г. Петропавловска – Камчатского. Среди этих событий сильнейшее ( $M_w=8.3$ ) глубокофокусное Охотоморское землетрясение, произошедшее 24 мая 2013 г., рой сильных землетрясений в Авачинском заливе в мае 2013 г., произошедшее 14 августа 2012 г. сильнейшее ( $M_w=7.7$ ) глубокое ( $H=626$  км) землетрясение с эпицентром в районе Охотского моря, сильное Южно - Камчатское землетрясение ( $M_w=6.9$ ). Ниже рассматриваются основные результаты, полученные во временных окрестностях указанных сейсмических событий на основе данных сети непрерывных комплексных скважинных измерений Петропавловск – Камчатского геодинамического полигона. В комплекс измерений входили: геоакустические измерения [7] в четырех скважинах на глубинах от 200 до 1012 м; электромагнитные измерения с подземными электрическими антеннами [1] на четырех скважинах; измерения уровня воды на одной из скважин; гидрогеохимические измерения [6] на двух скважинах, измерения дебита одной из скважин. Геоакустические и электромагнитные измерения, входящие в состав измерительного комплекса, позволяют вести непрерывный мониторинг изменений удельного сопротивления геосреды в зоне скважины, скорости фильтрации жидкого флюида, площади соприкосновения жидкой и твердой фаз в порово – трещинном пространстве контролируемой геофоном шумовой зоны. При этом в качестве основного применялся метод, базирующийся на контроле изменений среднеквадратических значений (СКЗ) амплитуд откликов геоакустической эмиссии (ГАЭ) на изменения СКЗ амплитуд напряженности электрической составляющей внешнего электромагнитного излучения (ЭМИ) звукового диапазона частот, воздействующего на геосреду в районе той же скважины [2]. Совместно с данными гидрогеохимических и гидрогеодинамических измерений применение указанных скважинных геоакустических и электромагнитных измерений позволяло оценивать характер изменений напряженно – деформированного состояния геосреды в зонах измерительных скважин.

### ***Изменения параметров ГАЭ во временной окрестности Тохокского мегаземлетрясения***

Катастрофическое Тохокское мегаземлетрясение ( $M_w = 9.0$ ) произошло 11 марта 2011 г. у восточного побережья о-ва Хонсю японской префектуры Тохоку на расстоянии около 2000 км от г. Петропавловска – Камчатского. Величина  $S=L_p/R_h$  ( $L_p = 10^{0.44M-1.29}$  – длина очага землетрясения [5];  $R_h$  – гипоцентральное расстояние), рассчитанное для указанного землетрясения, составила 23%. Тохокское мегаземлетрясение признано сильнейшим в истории Японии и вошло в десятку сильнейших землетрясений за всю историю сейсмических наблюдений в мире.

Анализ данных геоакустических измерений, полученных для шумовой зоны скважины Г-1 на глубине порядка 1000 м, показывает, что, по крайней мере, с октября 2009 г. начались значительные изменения параметров ГАЭ, регистрируемого в скважине Г-1. В первую очередь, это относится к резкому уменьшению максимальных амплитуд откликов для всех компонент ГАЭ, начиная с декабря 2009 г. (рис. 1). В наибольшей степени деградация откликов ГАЭ проявилась в результатах измерений по каналам одной из горизонтальных (X) и вертикальной (Z) компонент. К концу апреля 2011 г. произошла полная деградация откликов ГАЭ для указанных компонент. Вплоть до настоящего времени восстановления откликов для этих компонент не отмечено. Для горизонтального канала Y максимальная амплитуда откликов ГАЭ, начиная с декабря 2009 г., также значительно уменьшилась. На интервале декабрь 2009 г. – апрель 2011 г. значения максимальной амплитуды откликов ГАЭ для канала Y не превышали 25% от значений в ноябре 2009 г., оставаясь, вместе с тем, достаточно высокими для их обработки. Практически полная деградация откликов ГАЭ, регистрируемых по каналу Y, была отмечена в июле 2011 г. Постепенное восстановление откликов

ГАЭ началось в августе 2012 г., но даже спустя четыре года после Тохокского мегаземлетрясения амплитуда откликов оставалась низкой - примерно на порядок ниже, чем в августе 2010 г. (рис. 2а).

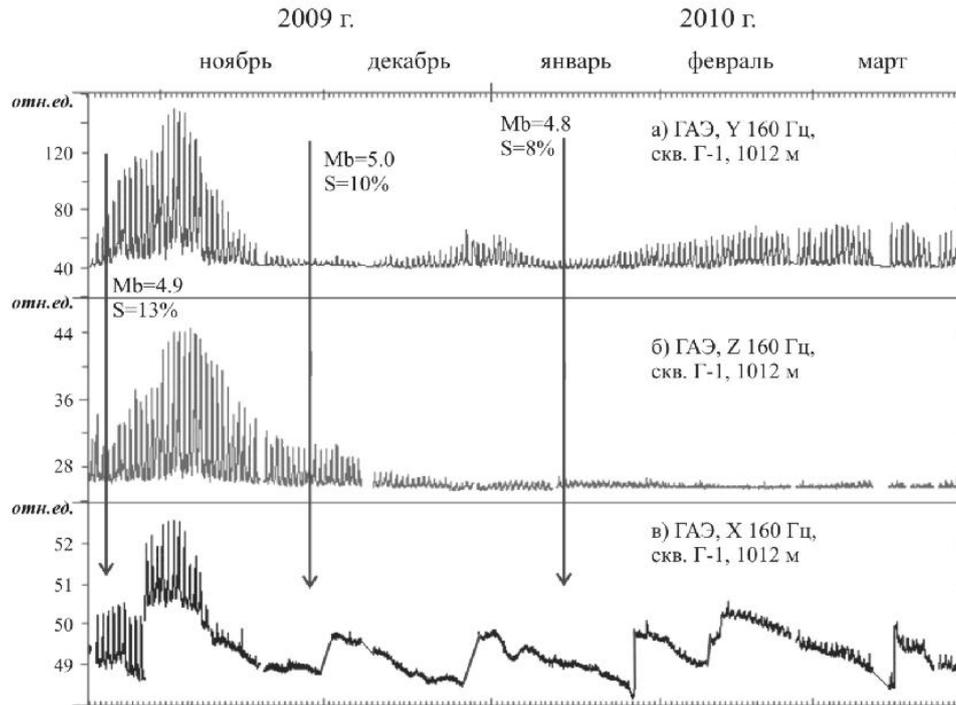


Рис. 1. Изменения амплитуд откликов ГАЭ на внешнее электромагнитное воздействие в октябре 2009 г. – марте 2010 г.

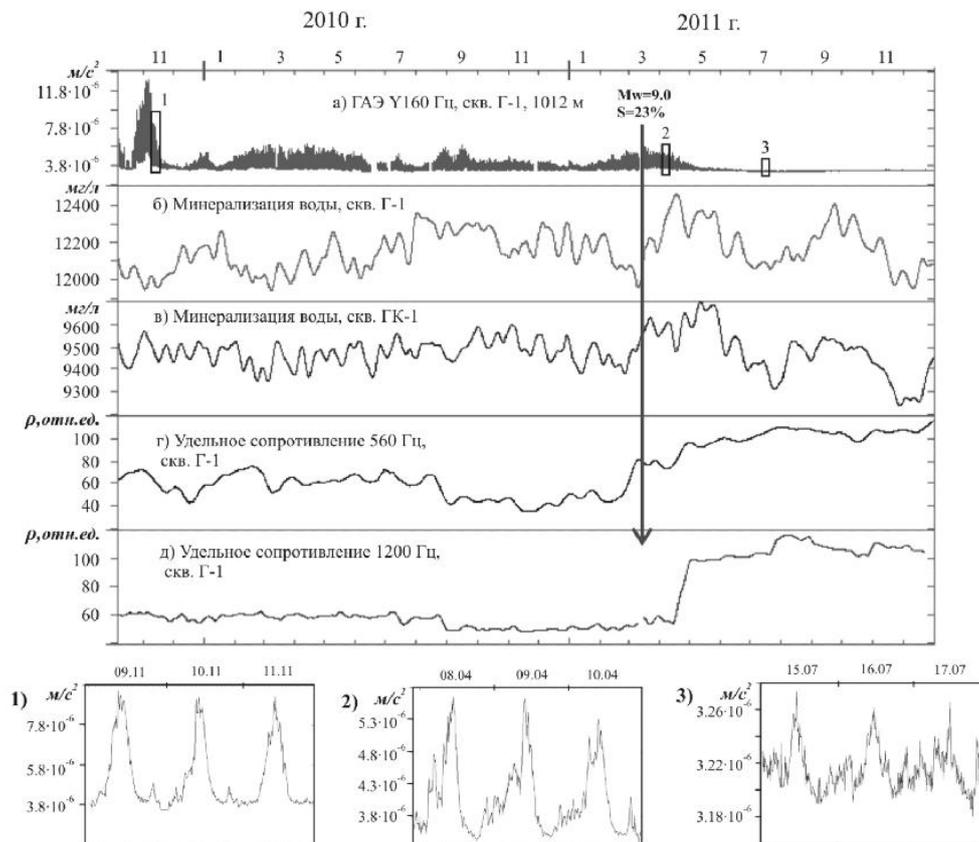


Рис. 2. Результаты комплексных скважинных измерений во временной окрестности Тохокского мегаземлетрясения: (а) – изменения СКЗ амплитуд откликов ГАЭ на глубине 1012 м, скважина Г-1; (б) - минерализация воды скважины Г-1, (в) - минерализация воды скважины ГК-1; (г) – изменение удельного сопротивления пород в зоне скважины Г-1 для канала 560 Гц; (д) – изменение удельного сопротивления пород в зоне скважины Г-1 для канала 1200 Гц.

Как показано в [2, 7], несмотря на большое (2049 км) эпицентрального расстояние, заключительная стадия подготовки Тохокского землетрясения, а также постсейсмическая стадия сопровождались значительными изменениями параметров пород в зонах измерительных скважин Петропавловск – Камчатского геодинамического полигона. Резкий значительный рост удельных сопротивлений, зарегистрированный по данным мониторинга удельного сопротивления пород прискважинной зоны (см. рис. 2г, д), указывает на значительное снижение флюидонасыщенности пород верхних и средних горизонтов прискважинной зоны вследствие Тохокского мегаземлетрясения. В свою очередь следствием аномального снижения флюидонасыщенности геосреды в шумовой зоне скважины Г-1 на глубинах порядка 1000 м явилось постепенное уменьшение амплитуд откликов для всех пространственных компонент ГАЭ вплоть до их практически полной деградации к июлю 2011 г. (см. рис. 2а).

### Характер изменений НДС геосреды в зоне скважины Г-1 после Тохокского мегаземлетрясения

Анализ полученных данных показывает, что отправной точкой для начала восстановления откликов ГАЭ для глубины 1012 м 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 (рис. 3). При этом рост амплитуд

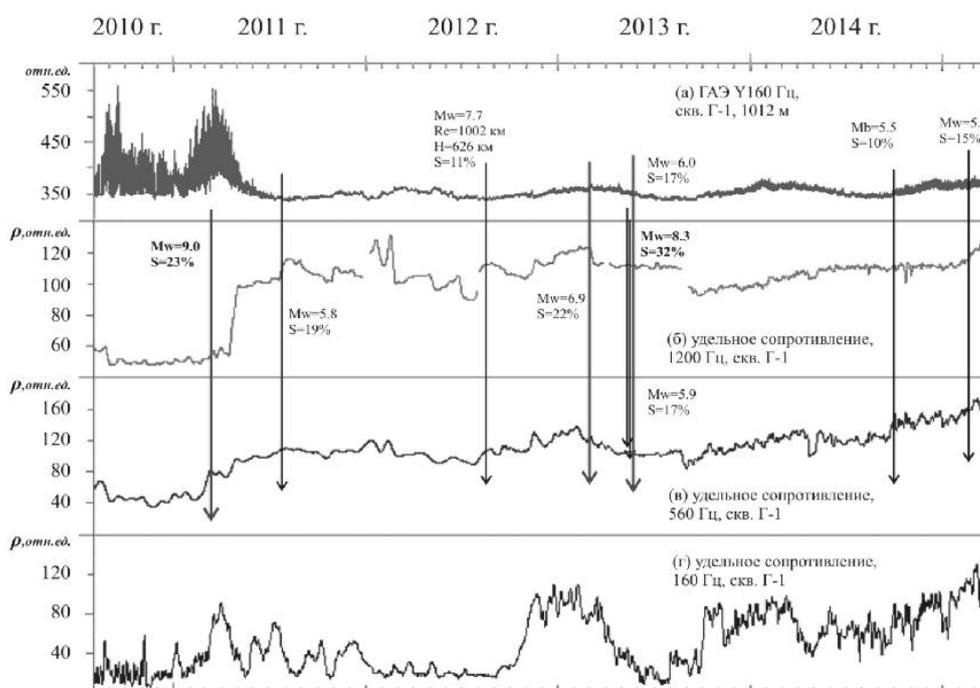


Рис. 3. Результаты геоакустических и электромагнитных скважинных измерений на интервале 2010 – 2014 гг.: (а) – изменения СКЗ амплитуд откликов ГАЭ на глубине 1012 м, скважина Г-1; (б) – изменение удельного сопротивления пород в зоне скважины Г-1 для канала 1200 Гц; (в) – изменение удельного сопротивления пород в зоне скважины Г-1 для канала 1200 Гц; (г) – изменение удельного сопротивления пород в зоне скважины Г-1 для канала 160 Гц.

откликов наблюдался лишь для  $Y$ - компоненты сигнала ГАЭ и отличался крайне низкой скоростью. Даже спустя девять месяцев после начала восстановления откликов ГАЭ их амплитуды были примерно в 25 раз меньше, чем накануне Тохокского мегаземлетрясения.

Как можно видеть из приводимых данных (см. рис.3а), на интервале август 2012 г. – июль 2013 г. заметна тенденция возрастания амплитуды откликов ГАЭ для горизонтального канала  $Y$ . При этом важно отметить, что рост амплитуды откликов происходил на фоне **роста удельного сопротивления пород** прискважинной зоны.

Рассмотрим возможные физические причины, способные объяснить такой результат. Основываясь на теоретических проработках, касающихся физических причин изменений амплитуд откликов ГАЭ [8] и данных многолетних комплексных измерений на Петропавловск - Камчатском геодинамическом полигоне, столь значительный (в разы) рост амплитуд откликов ГАЭ должен быть

связан, прежде всего, с увеличением суммарной площади контактирующей с жидким флюидом поверхности пород шумовой зоны. В свою очередь, увеличение контактирующей с жидким флюидом поверхности возможно либо вследствие притока флюида в порово-трещинное пространство, либо за счет роста эффективной пористости (трещиноватости) пород. В обоих случаях для реализации указанных процессов требуется уменьшение всесторонних сжимающих напряжений в порово-трещинном пространстве. Но в последнем случае рост удельного сопротивления, связанный с ростом трещиноватости, возможен только при низкой флюидонасыщенности пород. Для водонасыщенных пород, как это отмечено, например, в [4], при росте объема порово-трещинного пространства удельное сопротивление пород будет падать, поскольку в этом случае флюид будет успевать заполнять микротрещины и поры, открывающиеся на стадии уменьшения всесторонних сжимающих напряжений.

Согласно приводимым в [2] результатам анализа данных комплексных скважинных измерений, сразу после Тохокского мегаземлетрясения имело место интенсивное выжимание жидкого флюида из порово-трещинного пространства зоны скважины Г-1, что явилось основной причиной деградации откликов ГАЭ для глубин порядка 1000 м (см. рис. 2). Учитывая, что очень низкие значения амплитуд откликов ГАЭ имели место вплоть до июня 2015 г., можно сделать однозначный вывод о том, что **низкая флюидонасыщенность** пород шумовой зоны скважины Г-1 на глубинах порядка 1000 м сохранялась и на интервале август 2012 г. – июнь 2015 г.

Оценим с чем, прежде всего, в таком случае мог быть связан значительный рост амплитуд откликов ГАЭ: с притоком флюида или с увеличением эффективной пористости (трещиноватости) пород. Ответ на этот вопрос позволяют получить данные, приводимые рис. 4. Можно видеть, что, во-первых, после момента глубокого сильного землетрясения 14 августа 2012 г. наступила стадия стабильного продолжительного роста амплитуд откликов ГАЭ (рис. 4а). Во-вторых, из приводимых

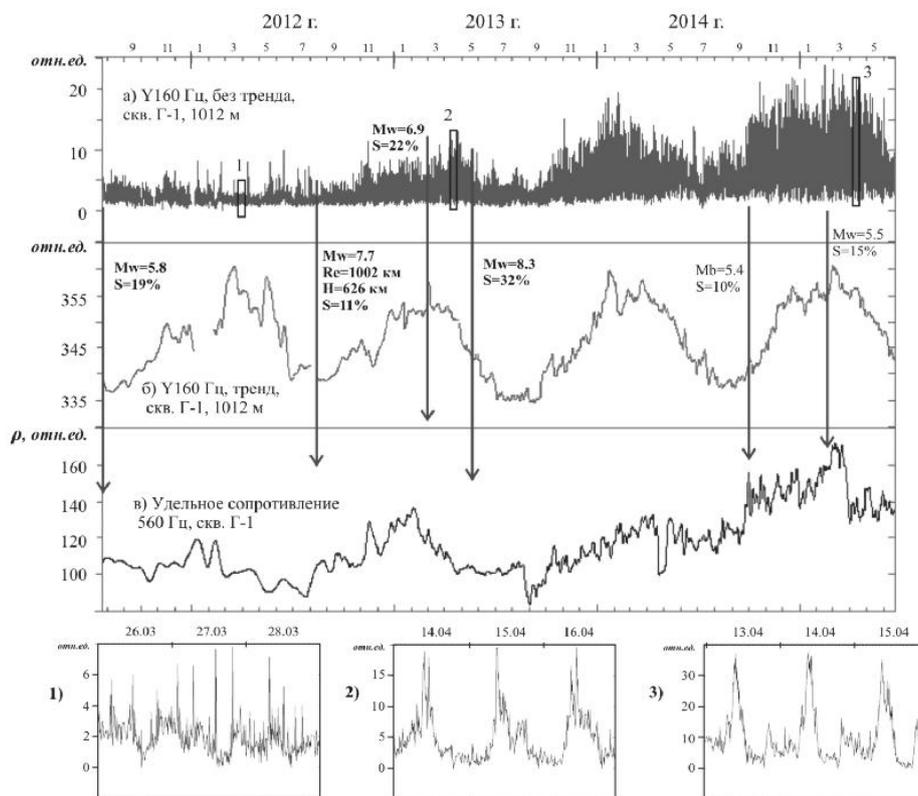


Рис. 4. Характер изменений амплитуд откликов ГАЭ на внешнее ЭМИ после сильнейшего глубокого землетрясения 14.08. 2012 г. (а) в сопоставлении с изменениями трендовой составляющей ряда ГАЭ (б) и удельного сопротивления пород зоны скважины Г-1 (в).

данных очевидна высокая корреляция вариаций огибающей откликов ГАЭ (рис. 4а) с вариациями скорости фильтрации в шумовой зоне скважины Г-1 (рис. 4б) на интервале июнь 2013 г. – июнь 2015 г., т.е. после сильнейших сейсмических событий в мае 2013 г.

Для понимания физической сути данных, приводимых на рис. 4б, необходимо пояснить, что изменения трендовой составляющей рядов ГАЭ в общем случае связаны с изменениями уровня шумов трения в контролируемом геофоном порово-трещинном пространстве шумовой зоны. При достаточно высокой флюидонасыщенности шумовой зоны изменения трендовой составляющей рядов ГАЭ отражают изменения скорости фильтрации жидкого флюида. В случае экстремально низкой флюидонасыщенности рост трендовой составляющей будет связан с возрастанием сил трения скольжения между гранулами пород и бортами существующих трещин из-за увеличения коэффициентов трения и роста сил нормального давления. Также необходимо подчеркнуть, что согласно [8], отсутствие откликов ГАЭ на внешнее ЭМИ указывает на крайне низкую флюидонасыщенность контролируемой геофоном шумовой зоны. В этой связи, учитывая отсутствие откликов ГАЭ на интервале август 2011 г. – июнь 2012 г., (см. врезку 1 к рис. 4), рост трендовой составляющей ГАЭ на этом интервале означает возрастание сил трения скольжения между гранулами пород и бортами существующих трещин вследствие очень низкой флюидонасыщенности пород в этот период. В отличие от этого **появление и рост амплитуд откликов ГАЭ** после сильнейшего глубокого землетрясения 14.08.2012 г. (см. врезку 2, 3 к рис. 4) указывает, что вариации трендовой составляющей ГАЭ в августе 2012 г. – июне 2015 г. связаны с изменениями скорости фильтрации жидкого флюида в зоне скважины Г-1.

Выражая скорость фильтрации  $W$  через действительную среднюю скорость движения флюида в порах  $V_d$  и эффективную пористость  $n$  [3] получим:  $W = V_d n$ . С учетом приводимого выражения высокая коррелированность изменений огибающей амплитуд откликов ГАЭ с вариациями скорости фильтрации означает, **что изменения амплитуд откликов ГАЭ на стадии июнь 2013 г. – июнь 2015 г. были обусловлены, в первую очередь, изменениями проницаемости пород в зоне скважины Г-1**. В частности, **рост** амплитуд откликов ГАЭ (например, на интервале октябрь 2013 г. – июнь 2014 г., см. рис. 4а), являлся следствием увеличения суммарной площади контактирующей с жидким флюидом поверхности пород порово-трещинного пространства зоны скважины Г-1 за счет увеличения раскрытости микротрещин на таких интервалах.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 15-05-08790).

### Список литературы

1. Гаврилов В.А. О методе непрерывного мониторинга удельного электрического сопротивления горных пород // Сейсмические приборы. М.: ИФЗ РАН, 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. Мироненко В.А. Динамика подземных вод. М.: Изд-во МГГУ. 2005. 519 с.
4. Мячкин В.И. Процессы подготовки землетрясений. М.: Наука. 1978. 232 с.
5. Ризниченко Ю.В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Исследования по физике землетрясений. М.: Наука, 1976. С. 9-26.
6. Хаткевич Ю.М., Рябинин Г.В. Гидрогеохимические исследования на Камчатке в связи с поиском предвестников землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2006. № 4. С. 34-42.
7. Gavrilov V.A., Panteleev I.A., Ryabinin G.V., Morozova Yu.V. Modulating impact of electromagnetic radiation on geoaoustic emission of rocks // Russian journal of Earth sciences. 2013. V. 13. ES1002, doi:10.2205/2013ES000527.
8. Gavrilov V. A. On the Mechanism of Variations in the Intensity of Geoaoustic Emission Caused under the Action of Audio-Frequency Electromagnetic Field // Russian journal of Earth sciences. 2014. V. 14, No. 2, October 2014.