

**Результаты одновременных геоакустических измерений на разных глубинах в скважине Г-1: связь с особенностями геологического строения околоскважинного пространства**

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

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

Оцениваются результаты многолетних одновременных геоакустических измерений двумя однотипными геофонами, установленными в скважине Г-1 на глубинах 1012 м и 270 м в разных зонах, разделенных внедрением диоритов на глубинах 589-734 м.

Скважина Г-1, расположенная в черте г. Петропавловска-Камчатского, явилась первым пунктом сети комплексных скважинных геофизических измерений Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона. С 2000 г. на базе указанной скважины ведутся непрерывные геоакустические измерения, а с 2003 г. – электромагнитные измерения с подземной электрической антенной. Также проводится ряд других непрерывных геофизических измерений в целях мониторинга изменений напряженно-деформированного состояния (НДС) геосреды. Выбор скважины Г-1 для измерений был обусловлен ее значительной глубиной (2540 м) и расположением скважины в хорошо развитой разломной зоне. Скважина обсажена на всю глубину, уровень воды в настоящее время находится на уровне дневной поверхности, дебит самоизлива воды не превышает 0.00003 л/с.

Измерения на базе скважины Г-1 позволили получить основной объем данных геоакустических и электромагнитных измерений, а также наиболее значимые научные результаты. По состоянию на март 2021 г., на базе скважины Г-1 проводятся: геоакустические измерения в диапазоне 0.2-1500 Гц на глубине 1012 м (три компонента) и 270 м (вертикальная компонента) по четырем частотным каналам; электромагнитные измерения с использованием подземной электрической антенны в диапазоне 0.5-1500 Гц по четырем частотным каналам; измерения удельной электропроводности воды скважины. Режим всех измерений непрерывный. Данные передаются в ИВиС ДВО РАН по телеметрическим каналам по запросу оператора (в обычном режиме – ежедневно, кроме выходных и праздничных дней). Измерительный пункт на базе скважины Г-1 входит в состав сети комплексных скважинных измерений Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона, состоящей сейчас из пяти измерительных пунктов и центра сбора и обработки информации в здании ИВиС ДВО РАН. Сеть обеспечивает непрерывный мониторинг по восьми видам геофизических измерений (в целом более 60 измерительных каналов). Фактически, указанная сеть является информационной основой действующей системы средне- и краткосрочного (вероятностного) прогноза сильных камчатских землетрясений. Подходы к краткосрочному прогнозированию землетрясений в значительной степени опираются на разработанные в ИВиС ДВО РАН методы мониторинга изменений НДС геосреды, базирующиеся на данных скважинных геоакустических измерений и электромагнитных измерений с подземными электрическими антеннами. Указанные методы позволяют контролировать интенсификацию процессов дилатансии и флюидизации геосреды в районе Авачинского залива и, в соответствии с концепцией дилатансно-диффузионной модели подготовки землетрясения, имеют первостепенное значение для выделения заключительной стадии его подготовки. Основой первого из методов является эффект модуляции амплитуды геоакустической эмиссии (ГАЭ) слабым переменным электрическим полем [1, 6]. Второй из методов базируется на данных измерений с подземными электрическими антеннами [2].

## Особенности геологического строения участка скважины Г-1 на разных глубинах

Скважина Г-1 расположена в пределах Петропавловского горста в зоне пересечения трех различно ориентированных систем разломов: регионального разлома северо-западного направления, субмеридионального и субширотного. Рассмотрение детальной схемы расположения скважины Г-1 (рис. 1) показывает, что на глубине 1400 м скважина попадает в зону обводненного разлома Совхозного.

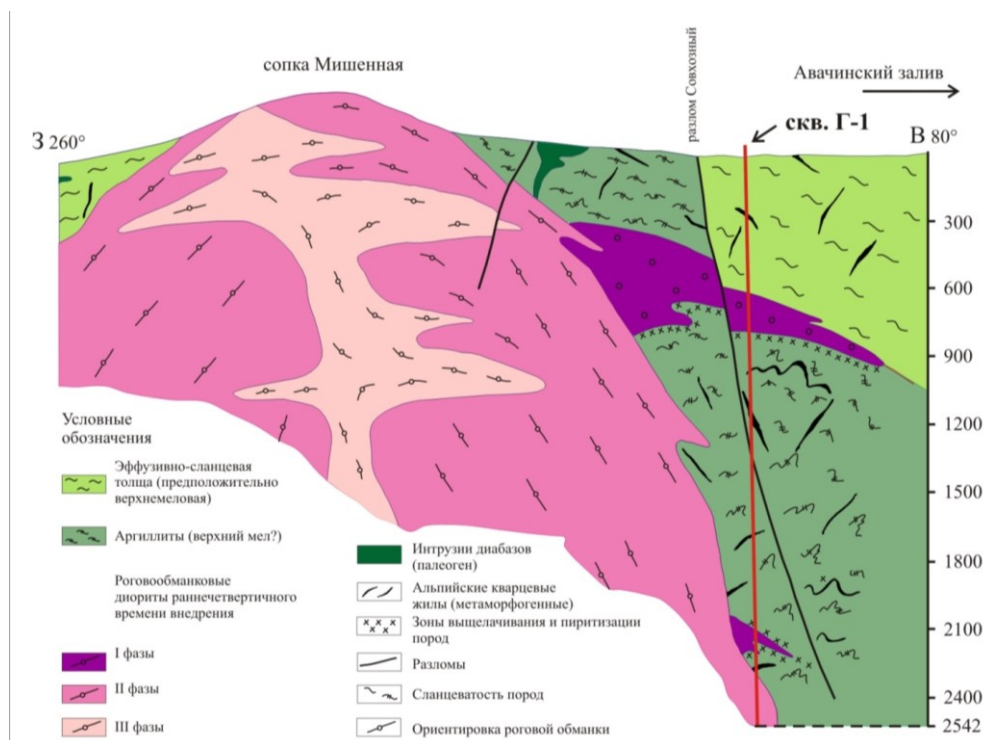


Рис. 1. Детальная схема расположения скважины Г-1 (согласно [5]).

Согласно данным бурения, в интервале 1700-1800 м скважина Г-1 пересекает трещиноватую зону, обеспечивающую для скважины основной водоприток. Предполагается, что скважиной вскрыта периферийная зона циркуляции, в пределах которой фильтрация происходит по тектоническим трещинам малой раскрытости [5]. В интервалах глубин 589-734 м скважина Г-1 пересекает внедрения диоритов раннеплейстоценового возраста, представляющих периферийные зоны экструзивного массива сопки Мишенной [5]. Зона внедрения диоритов характеризуется высокими значениями удельного сопротивления пород, что соответствует низким значениям коэффициента фильтрации пород в зоне внедрения диоритов. Таким образом, внедрение диоритов фактически разделяет околоскважинное пространство по глубине на две зоны, гидравлическая связь между которыми затруднена.

## Результаты одновременных геоакустических измерений в скважине Г-1 на глубинах 270 м и 1012 м

Данные измерений в скважине Г-1 геофонами, установленными на глубинах 270 м и 1012 м, позволяют сделать вывод, что шумовые зоны, контролируемые указанными геофонами, не пересекаются, т.е. их радиус менее 350 м. Принимая радиус шумовой зоны для частот 150-160 Гц равным 300 м, получаем, что геофон, установленный на глубине 270 м, способен контролировать геоакустические процессы, происходящие в интервале глубин примерно до 570 м. Соответственно, для геофона, установленного на глубине 1012 м, такой интервал расположен ниже зоны внедрения диоритов и ориентировочно его можно оценить диапазоном глубин 700-1300 м.

Анализ данных многолетних одновременных измерений двумя однотипными геофонами, установленными на глубинах 1012 м и 270 м, указывает на значительные различия в получаемых при этом результатах. В первую очередь, это относится к большой разнице в чувствительности нижней и верхней зон к подготовке сильных сейсмических событий. Это хорошо видно из данных, представленных на рис. 2, где сравниваются результаты одновременных геоакустических измерений в скважине Г-1 на разных глубинах на заключительной стадии подготовки Тохокского мегаземлетрясения ( $M_w=9.0$ ), произошедшего в Японии 11 марта 2011 г. Поясним, что изменения амплитуд суточных вариаций геоакустической эмиссии (см. врезки к рисунку) отражают изменения влажности геосреды в шумовой зоне геофона: уменьшение амплитуды вариаций связано с уменьшением влажности геосреды в контролируемой геофоном зоне, увеличение амплитуды – с ростом влажности [6].

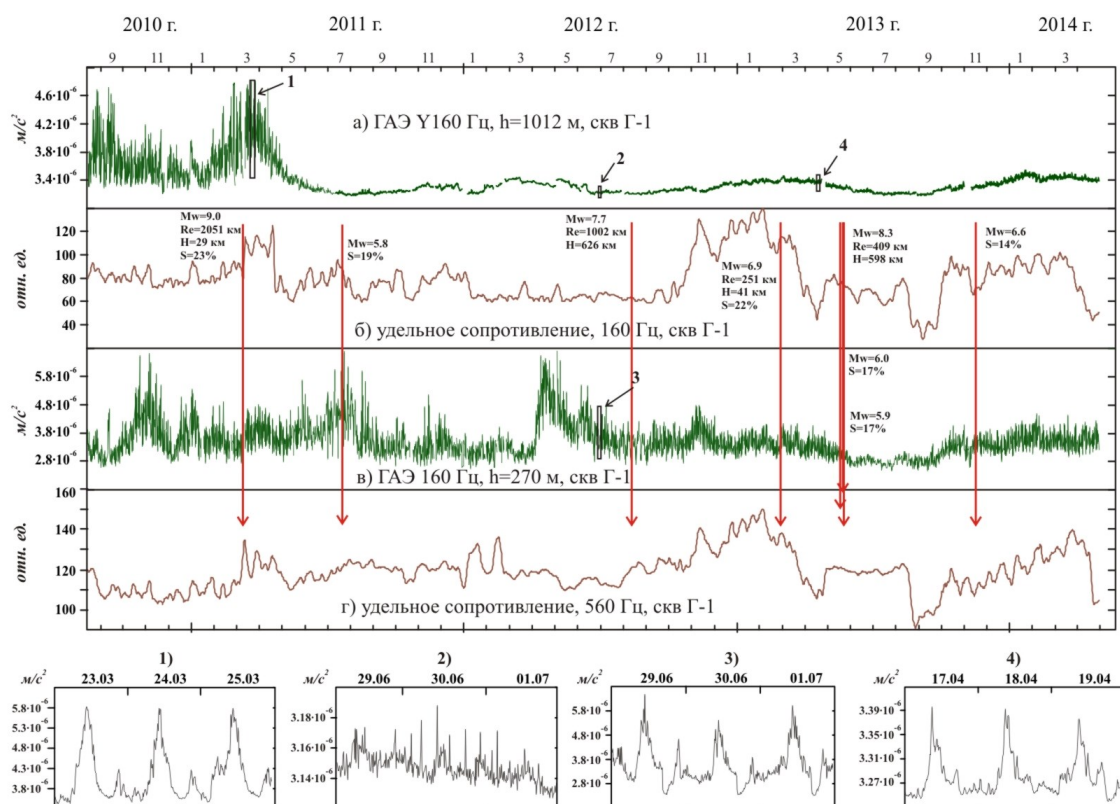


Рис. 2. Сравнение результатов одновременных геоакустических измерений в скважине Г-1 на разных глубинах на заключительной стадии подготовки Тохокского мегаземлетрясения: а) – среднеквадратические значения ГАЭ для глубины 1012 м (Y-компонента, канал 160 Гц); б) – изменения удельного сопротивления пород в зоне скважины Г-1 по данным канала 160 Гц; в) – среднеквадратические значения ГАЭ для глубины 270 м (Z-компонента, канал 160 Гц); г) – изменения удельного сопротивления пород в зоне скважины Г-1 по данным канала 560 Гц.

Из данных рис. 2 можно видеть, что во временной окрестности  $\pm 2.5$  месяца от момента Тохокского мегаземлетрясения амплитуды суточных вариаций откликов ГАЭ для верхней зоны менялись незначительно (рис. 2в), в то время как по результатам измерений в нижней зоне имела место значительная бухтообразная аномалия откликов ГАЭ (рис. 2а). Также для верхней зоны не проявился и постсейсмический эффект деградации амплитуды откликов ГАЭ, в то время как, по данным измерений на глубине 1012 м, постсейсмический эффект был аномальным не только по амплитудам откликов ГАЭ, но и по своей продолжительности (годы).

Характер комплекса данных скважинных измерений на интервале после момента Тохокского мегаземлетрясения и до конца августа 2012 г. соответствует стадии роста сжимающих напряжений, а интервал сентябрь 2012 г. – декабрь 2014 г.

соответствует стадии растяжения геосреды в зоне Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона [3, 4].

Следствием роста сжимающих напряжений в первые месяцы после Тохокского мегаземлетрясения явилось интенсивное выжимание жидкого флюида из порово-трещинного пространства геосреды для глубин около 700-1300 м, что отразилось в увеличении удельного сопротивления пород этого диапазона глубин примерно на 350 % от уровня декабря 2010 г. (см. рис. 2б). На стадии сжатия имело место уменьшение откликов ГАЭ для глубин порядка 1000 м вплоть до их полной деградации к июлю 2012 г. Такой результат объясняется значительным уменьшением влажности пород прискважинной зоны на глубинах порядка 1000 м.

Для верхней зоны в районе скважины Г-1 (глубины примерно до 570 м) изменения влагонасыщенности геосреды на том же временном интервале (март 2011 г. – конец августа 2012 г.) были незначительны. На это указывают результаты электромагнитных измерений по каналу 560 Гц (см. рис. 2г), показывающие, что до сентября 2012 г. удельное сопротивление пород прискважинной зоны до глубин порядка 400 м менялось лишь в пределах 20 %. Приводимые выше результаты указывают на значительно более высокую чувствительность нижней зоны к изменениям НДС геосреды при подготовке сильных землетрясений в сравнении с чувствительностью верхней зоны. Физические причины таких результатов можно объяснить тем, что нижняя зона имеет хорошую гидравлическую связь с развитой разломной структурой Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона, в то время как верхняя зона экранирована от разломной структуры внедрением диоритов в интервалах глубин 589-734 м (см. рис. 1).

В заключение следует указать ещё на два важных момента. Во-первых, крайне важным условием эффективности мониторинга процессов флюидизации геосреды, связанных с подготовкой землетрясений, является расположение измерительных скважин в зонах с развитыми структурами активных разломов и наличие хорошей гидравлической связи с такими структурами. Во-вторых, самое серьезное значение при проведении долговременных скважинных геоакустических измерений может иметь выбор глубины установки геофона. При сложном геологическом строении участка скважины наиболее информативный горизонт должен выбираться с учетом данных бурения и результатов экспериментальных измерений.

### Список литературы

1. 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.
2. Гаврилов В.А. О методе непрерывного мониторинга удельного электрического сопротивления горных пород // Сейсмические приборы. 2013. Т. 49. № 3. С. 25-38.
3. 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.
4. Гаврилов В.А., Полтавцева Е.В., Децеровский А.В. и др. Мониторинг состояния геосреды на основе синхронных геоакустических и электромагнитных скважинных измерений: использование естественного электромагнитного излучения // Сейсмические приборы. 2015. Т. 51. № 4. С. 41-57.
5. Отчет о результатах бурения на термальные воды поисковой скважины Г-1 на участке «Хлебозавод» Петропавловской площади в 1986-1988 гг. Петропавловск-Камчатский, 1988. 193 с.
6. Gavrilov V.A., Naumov A.V. Modulation of geoacoustic emission intensity by time-varying electric field // Russian Journal of Earth Sciences. 2017. V. 17. ES1003. <http://doi.org/10.2205/2017ES000591>.