

УДК 550.348

СОПОСТАВЛЕНИЕ ДАННЫХ СКВАЖИННЫХ ГЕОАКУСТИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ С ДАННЫМИ ПО МЕХАНИЗМАМ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

В. А. Гаврилов^{1,*}, А. В. Ландер², Ю. В. Морозова¹

Представлено академиком РАН Е. И. Гордеевым 16.07.2018 г.

Поступило 03.08.2018 г.

Приводятся результаты сопоставления данных двух методов скважинного геофизического мониторинга напряжённо-деформированного состояния геосреды в зоне Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона с данными по механизмам очагов землетрясений, произошедших в этой зоне на том же временном интервале.

Ключевые слова: геоакустическая эмиссия, электромагнитное излучение, механизмы очагов землетрясений, скважина, Петропавловск-Камчатский геодинамический полигон, напряжённо-деформированное состояние геосреды.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524846745-749>

Проводимые с начала 2000-х годов на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне (зона радиусом примерно 100 км с центром в г. Петропавловске-Камчатском) скважинные геоакустические измерения и электромагнитные измерения с подземными электрическими антеннами позволяют сделать вывод о высокой эффективности двух новых методов мониторинга напряжённо-деформированного состояния (НДС) геосреды, основой которых являются данные указанных видов измерений.

Первый из методов базируется на открытом в ходе многолетних исследований на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне эффекте модуляции интенсивности геоакустической эмиссии (ГАЭ) слабым переменным электрическим полем [1–3]. Физическая суть эффекта заключается в зависимости интенсивности геоакустических процессов от амплитуды напряжённости переменного электрического поля, воздействующего на геосреду в зоне измерительной скважины, и степени влажности геосреды [4]. Например, воздействие на геосреду внешнего электромагнитного излучения (ЭМИ) с суточными вариациями амплитуды напряжённости поля будет вызывать соответствующие

суточные вариации амплитуды ГАЭ — отклики ГАЭ на воздействие ЭМИ. При постоянных амплитудах суточных вариаций ЭМИ амплитуды откликов ГАЭ на воздействие ЭМИ будут определяться степенью влажности геосреды.

Данные многолетних измерений на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне показывают, что для заключительных стадий подготовки подавляющего числа местных сильных землетрясений, а также для ряда сильных землетрясений с эпицентрными расстояниями более 1000 км характерны быстрые и значительные изменения амплитуд откликов ГАЭ на воздействие внешнего ЭМИ. Согласно результатам исследований физические причины указанного эффекта связаны с процессами перераспределения порового давления в порово-трещинном пространстве прискважинной зоны вследствие изменений НДС геосреды на заключительных стадиях подготовки землетрясений [5, 6]. Отметим, что указанный эффект стабильно наблюдается для землетрясений, для которых величина $S = L/R_h \cdot 100\%$ ($L = 10^{0,44M-1,29}$ — длина очага землетрясения в км при аппроксимировании формы очага эллипсом; R_h — гипоцентральное расстояние в км, M — магнитуда землетрясения) составляет $\geq 5\%$.

Второй из указанных в начале статьи методов непрерывного мониторинга изменений НДС геосреды базируется на данных электромагнитных измерений с использованием подземных электрических антенн, что позволяет контролировать изменения удельного сопротивления $\Delta\rho$ геосреды в зоне скважины [7]. Метод характерен своей высокой

¹ Институт вулканологии и сейсмологии
Дальневосточного отделения Российской Академии наук,
Петропавловск-Камчатский

² Институт теории прогноза землетрясений
и математической геофизики
Российской Академии наук, Москва

*E-mail: vgavr1403@mail.ru

тензочувствительностью и стабильностью результатов: перед всеми сильными землетрясениями с $S \geq 20\%$, произошедшими с 2006 г., изменения величины $\Delta\rho$, контролируемой данным методом, достигали 350–700%. К примеру, накануне сильнейшего Жупановского землетрясения ($M = 7,2$; $S = 39\%$), произошедшего 30 января 2016 г. на эпицентральной дистанции $R_e = 107$ км от г. Петропавловска-Камчатского на глубине 161 км, величина $\Delta\rho$ за двое суток до землетрясения изменилась примерно на 700% [8].

Полученные к настоящему времени результаты ставят ряд вопросов, ответы на которые необходимы для дальнейшего развития исследований. В том числе необходимо понимание того, насколько результаты мониторинга НДС геосреды, базирующиеся на данных скважинных геоакустических и электромагнитных измерений, согласуются с данными других видов измерений, отражающих изменения параметров поля сейсмоструктурных напряжений в той же зоне. В этой связи авторами было проведено сопоставление результатов мониторинга НДС, базирующихся на данных скважинных геоакустических и электромагнитных измерений, с данными по механизмам очагов землетрясений, произошедших на том же временном интервале в районе Авачинского залива (восточная Камчатка) — одной из наиболее сейсмически активных областей Курило-Камчатской дуги.

Для проведения исследований использовались данные геоакустических и электромагнитных измерений, полученные при измерениях на базе скважины Г-1 на интервале ноябрь 2009 г. — июль 2017 г. Скважина Г-1 расположена на окраине г. Петропавловска-Камчатского на удалении около 15 км от береговой черты Авачинского залива. Скважина имеет глубину 2542 м, обсажена на всю глубину. В исследованиях использовались данные геоакустических измерений, проводимые на глубине 1012 м с применением трёхкомпонентного геофона с пьезоэлектрическими датчиками типа А1612. Данные электромагнитных измерений были получены с использованием подземной электрической антенны, основным конструктивным элементом которой является обсадная колонна скважины [7].

Касаясь использованных в исследованиях данных по механизмам очагов землетрясений, отметим, что согласно полученным к настоящему времени результатам ключевую роль для восточной Камчатки играют сжимающие напряжения, ориентированные преимущественно в северо-западном направлении вкрест простирания основных морфоструктур [9, 10].

Это относится ко всей пологой верхней части Камчатской зоны субдукции, что приблизительно соответствует области K на рис. 1, простирающейся от $50,0^\circ$ до $56,6^\circ$ с.ш., в том числе к району Авачинского залива (область A , являющаяся частью области K , рис. 1). Основное поле сейсмоструктурных напряжений области K отражается в устойчивом повторении здесь взбросовых механизмов с юго-западным простиранием плоскостей разрыва. Для среднего тензора сейсмического момента, построенного по 309 сильнейшим землетрясениям, произошедшим в области K за период 1976–2017 гг. (выборка из каталога GCMТ всех событий области, относящихся к зоне субдукции, с глубинами до 70 км), азимут простирания плоскости разрыва равен 210° , а ось сжатия субгоризонтальна (угол наклона равен 16°) и направлена по азимуту 125° . Основную часть этих событий составляют землетрясения с магнитудой $M_w > 5,0$. В область A (рис. 1) вошла подвыборка из 176 землетрясений, эпицентры которых наиболее близко расположены к району г. Петропавловска-Камчатского. Аналогичные параметры среднего механизма этих землетрясений

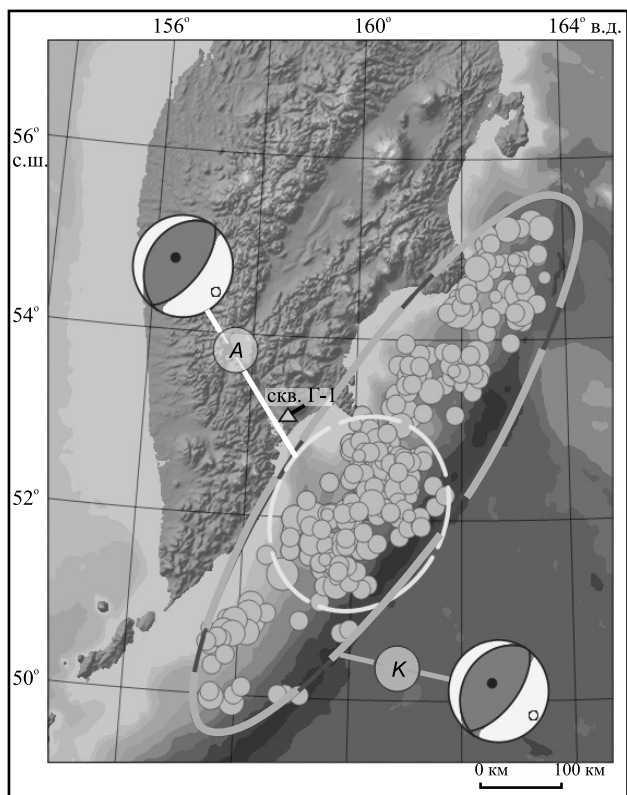


Рис. 1. Приблизительные границы областей K и A и эпицентры центровидов использованных субдукционных землетрясений с $M_w > 5,0$, произошедших в этих областях за период 1976–2017 гг. (кружки внутри областей). Представлены также диаграммы средних тензоров для каждой из областей.

практически совпадают с соответствующими значениями для более протяжённой области K : азимут простирания плоскости разрыва 212° , угол наклона и азимут оси сжатия соответственно 17° и 127° .

Выше была отмечена высокая устойчивость повторений типа механизма очагов землетрясений верхней части Камчатской зоны субдукции. Однако в отдельных случаях здесь имеют место события, существенно отличающиеся по типу очаговых деформаций от остальных событий. Можно предположить, что такие землетрясения с нетипичными механизмами очагов происходят в интервалы времени, когда в общем региональном или локальных полях сейсмотектонических напряжений возникают определённые изменения. Для сравнения с результатами геоакустических и электромагнитных измерений, полученными при измерениях на базе скважины Г-1, были выбраны землетрясения области A из-за близости этой зоны к месту расположения скважины Г-1. Сравнения проводили на временном интервале 2008–2017 гг., надёжно представленном данными скважинных измерений. Подкаталог тензоров сейсмического момента области A за это время представлен 59 событиями.

Для перехода от дискретных механизмов очагов землетрясений к непрерывным временным рядам напряжений, сброшенным в ходе сейсмического процесса, соответствующие тензоры (пятимерные линейные объекты) сглаживались скользящими временными (косинусоидальными) окнами. Эффективная ширина окна сглаживания составляла около 10 месяцев. Таким образом, для каждого момента вычислялся “локально-средний” по времени (и выбранной пространственной области) механизм. По соответствующему тензору независимо для каждого момента времени вычислялись параметры его главных осей (рис. 2в, г). Подчеркнём, что кривые азимута главной оси сжатия (рис. 2в) и наклона к горизонту главной оси сжатия (рис. 2г) являются результатом осреднения соответствующих тензоров, но не результатом сглаживания соответствующих азимуты и наклоны.

Сравнивая данные скважинных геоакустических и электромагнитных измерений, представленные на рис. 2, с изменениями параметров механизмов очагов землетрясений, можно отметить следующее.

1. Как показано в [3, 5], резкое и значительное уменьшение амплитуд откликов ГАЭ на воздействие внешнего ЭМИ с одновременным уменьшением удельного электрического сопротивления геосреды в зоне скважины Г-1 на интервале март 2011 г. — август 2012 г. (рис. 2а, б) могут являться следствием

аномально высокого роста сжимающих напряжений на постсейсмической стадии Тохокского мегаземлетрясения ($M_w = 9,0$), произошедшего 11.03.2011 г. на эпицентральной дистанции около 2000 км от г. Петропавловска-Камчатского. Из данных, приведённых на рис. 2, следует, что для осреднённых механизмов очагов землетрясений, произошедших на том же временном интервале в районе Авачинского залива, наблюдались значительные изменения азимута направления (рис. 2в) и угла наклона главной оси сжатия (рис. 2г).

2. Из данных, приведённых на рис. 2а, можно видеть, что сразу после момента сильнейшего ($M_w = 7,7$) глубокого ($H = 626$ км) землетрясения, произошедшего 14.08.2012 г. на эпицентральной дистанции около 1000 км от скважины Г-1 (см. врезку к рис. 2а), началось восстановление откликов ГАЭ в зоне скважины Г-1 для глубин порядка 1000 м. Как показано в [8], физические причины такого результата могут объясняться началом роста влажности пород в зоне скважины Г-1 вследствие увеличения объёма порово-трещинного пространства геосреды в связи с переходом НДС геосреды от стадии сжатия к стадии относительного растяжения. В этой связи интервал сентябрь 2012 г. — апрель 2015 г. по данным скважинных измерений интерпретируется как интервал относительного растяжения. Данные о механизмах очагов землетрясений (рис. 2в, г) указывают на то, что к моменту начала стадии растяжения (определённому по данным скважинных измерений) значения азимута направления (рис. 2в) и угла наклона главной оси сжатия (рис. 2г) вернулись к своим среднемноголетним значениям.

3. Аномальные изменения параметров ГАЭ (рис. 2а) и удельного электрического сопротивления геосреды (рис. 2б) в зоне скважины Г-1 на интервале май 2015 г. — июнь 2017 г. совпадают с заключительной стадией подготовки и реализацией сильнейшего (магнитуда $M_w = 7,2$) Жупановского землетрясения, произошедшего 30.01.2016 г. на эпицентральной дистанции $R_e = 107$ км от г. Петропавловска-Камчатского на глубине 161 км [12]. Как следует из данных, приведённых на рис. 2в, г, для этого временного интервала также наблюдаются синхронные отклонения от среднемноголетних значений параметров механизмов землетрясений: азимута (рис. 2в) и угла наклона (рис. 2г) главной оси сжатия сброшенных напряжений.

Таким образом, сопоставление результатов мониторинга НДС геосреды на основе данных геоакустических и электромагнитных измерений, проводимых на базе скважины Г-1, с данными по меха-

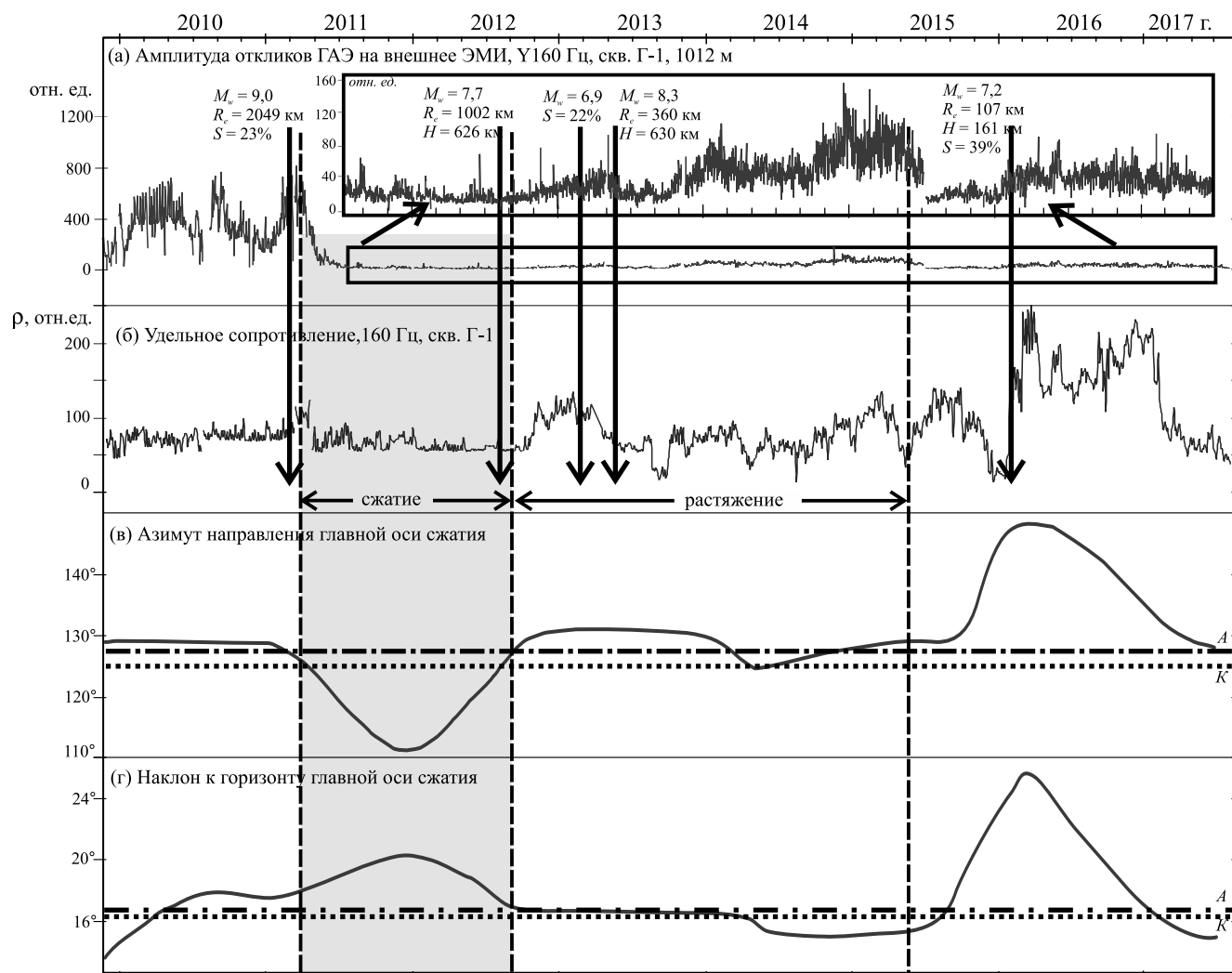


Рис. 2. Изменения параметров ГАЭ и удельного сопротивления геосреды в зоне скважины Г-1 в сравнении с изменениями параметров механизмов очагов землетрясений: а — среднеквадратические значения откликов ГАЭ на воздействие внешнего ЭМИ для глубины 1012 м (Y-компонента, канал 160 Гц), на врезке — изменения амплитуды откликов ГАЭ в более детальном масштабе; б — изменения удельного сопротивления пород в зоне скважины Г-1 на глубинах до 1000 м; в — азимут направления главной оси сжатия по данным о механизмах очагов землетрясений, штрихпунктирная и пунктирная горизонтальные линии А и К — значения азимута для среднего тензора для областей А и К соответственно; г — наклон к горизонту главной оси сжатия по данным о механизмах очагов землетрясений, штрихпунктирная и пунктирная горизонтальные линии А и К — значения наклона для среднего тензора для областей А и К соответственно. Стадии сжатия и растяжения определены по данным скважинных измерений.

низмам очагов землетрясений, произошедших в районе Авачинского залива, показывает их качественное согласование. Такой результат можно считать дополнительным подтверждением обоснованности использования скважинных геоакустических измерений и измерений с подземными электрическими антеннами для мониторинга НДС геосреды сейсмоактивных регионов.

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке Президиума ДВО РАН (грант № 18–5–095).

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. Gavrilov V., Bogomolov L., Morozova Yu., Storcheus A. Variations in Geoacoustic Emissions in a Deep Borehole and Its Correlation with Seismicity // Ann. Geophys. 2008. V. 51. № 5/6. P. 737–753.

3. *Gavrilov V.A., Panteleev I.A., Ryabinin G.V., Morozova Yu.V.* Modulating Impact of Electromagnetic Radiation on Geoacoustic Emission of Rocks // *Rus. J. Earth Sci.* 2013. V. 13. ES1002. DOI: 10.2205/2013ES000527.
4. *Gavrilov V.A., Naumov A.V.* Modulation of Geoacoustic Emission Intensity by Time-Varying Electric Field // *Rus. J. Earth Sci.* 2017. V. 17. № 1. DOI: 10.2205/2017ES000591.
5. *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.
6. *Гаврилов В.А., Пантелеев И.А.* Влияние фильтрационных процессов в горных породах на характеристики геоакустической эмиссии // *Геофиз. исслед.* 2016. Т. 17. № 2. С. 32–53.
7. *Гаврилов В.А.* О методе непрерывного мониторинга удельного электрического сопротивления горных пород // *Сейсм. приборы.* 2013. Т. 49. № 3. С. 25–38.
8. *Гаврилов В.А., Бусс Ю.Ю., Морозова Ю.В., Полтавцева Е.В.* Сквжинные геоакустические измерения в системе комплексного геофизического мониторинга и прогноза землетрясений на Камчатке // *Уч. зап. физ. фак-та МГУ.* 2017. № 5. С. 1750802-1–1750802-4.
9. *Ребецкий Ю.Л.* Напряженное состояние земной коры Курил и Камчатки перед Симуширскими землетрясениями // *Тихоокеан. геология.* 2009. Т. 28. № 5. С. 70–84.
10. Каталог GCMT: The Global Centroid-Moment-Tensor Project. www.globalcmt.org/CMTsearch.html
11. Единая информационная система сейсмологических данных КФ ФИЦ ЕГС РАН. <http://www.emsd.ru/sdis/info/earthquakes/catalogue.php>

COMPARISON OF BOREHOLE GEOACOUSTIC AND ELECTROMAGNETIC DATA WITH DATA OF EARTHQUAKE FOCAL MECHANISMS

V. A. Gavrilov, A. V. Lander, Yu. V. Morozova

Presented by Academician of the RAS E.I. Gordeyev July 16, 2018

Received August 3, 2018

The results of comparing the data of two methods of geophysical monitoring of the stress-strain state of a borehole of the geoenvironment in the zone of Petropavlovsk-Kamchatsky geodynamic testing site to the data on the focal mechanisms of earthquakes that occurred in this zone on the same time interval are presented.

Keywords: geoacoustic emission, electromagnetic radiation, earthquake focal mechanisms, borehole, Petropavlovsk-Kamchatsky geodynamic testing site, stress-strain state of the geoenvironment.