

Привлечение сейсмических данных к анализу результатов комплексного скважинного геофизического мониторинга процессов подготовки сильных камчатских землетрясений

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

Seismic data application for the analysis of the results of complex borehole geophysical monitoring of the processes preceding strong Kamchatka earthquakes

Buss Yu.Yu., Gavrilov V.A., Solomatina A.V., Morozova Yu.V., Poltavtseva E.V.

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

Приведены результаты совместного ретроспективного анализа данных комплексных скважинных измерений и данных сейсмических наблюдений. Показано, что такой подход может существенно повысить эффективность действующей на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне системы мониторинга процессов подготовки сильных камчатских землетрясений.

С начала 2000-х годов Сетью комплексных скважинных геофизических наблюдений на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне (ПГП) осуществляется непрерывный мониторинг напряженно-деформированного состояния (НДС) геосреды [2]. В целом, полученные к настоящему времени результаты позволяют сделать выводы о достаточно высокой эффективности используемых методов мониторинга НДС и об их перспективности для средне- и краткосрочного прогнозирования сильных камчатских землетрясений [1]. Вместе с тем, в ходе анализа результатов, получаемых по данным комплексных скважинных измерений, как правило, возникает ряд вопросов, поиск ответов на которые дополнительно требует привлечение результатов мониторинга НДС геосреды по другим видам измерений, в частности, результатов сейсмических наблюдений.

В 2018 г. были проведены исследования, в ходе которых результаты скважинных геоакустических (ГАЭ) и электромагнитных (ЭМИ) измерений, полученные на заключительных стадиях («активной фазе») подготовки сильных близких камчатских землетрясений, сравнивались с данными о механизмах очагов землетрясений, произошедших на том же временном интервале, в 2008-2017 гг. [3], в районе Авачинского залива. Для этой цели использовалась выборка из 176 землетрясений, эпицентры которых были наиболее близко расположены к району г. Петропавловск-Камчатский. Основную часть этих землетрясений составили события с магнитудами $M_W > 5.0$. В ходе исследований было установлено, что, несмотря на высокую в целом устойчивость повторений типа механизма очагов землетрясений Камчатской зоны субдукции, для ряда землетрясений, произошедших в 2008-2017 гг., имели место значительные отклонения азимута и угла наклона главной оси сжатия сброшенных напряжений от своих среднемноголетних значений, совпадающие по времени с аномальными изменениями в рядах данных скважинных измерений накануне момента землетрясения. При этом величины указанных отклонений определялись величиной параметра $S = (L/R_h) \cdot 100$, %, где $L = 10^{0.44M - 1.29}$ – длина очага землетрясения в км, рассчитанная согласно [6], M – магнитуда события, вычисленная по сейсмическому моменту; R_h – гипоцентральное расстояние в км. В частности, для Жупановского землетрясения приводимые в [3] результаты показали, что в период с июля 2014 г. по июль 2017 г. имели место значительные отклонения азимута и угла наклона главной оси сжатия сброшенных напряжений от своих среднемноголетних значений, согласующиеся по времени с аномально высокими (до 750 %) изменениями в рядах данных скважинных измерений накануне момента землетрясения.

Повторно к теме сравнения результатов комплексных скважинных измерений и данных об изменениях сейсмичности на заключительных стадиях подготовки сильных камчатских землетрясений авторы вернулись в 2023-2024 гг., выбрав в качестве

объектов исследований Жупановское ($M_w=7.2$; $Re=104$ км; $H=177$ км; $S=37\%$; 30.01.2016 г.) и Вилючинское ($M_w=6.5$; $Re=53$ км; $H=105$ км; $S=34\%$; 03.04.2023 г.) землетрясения. Указанные сейсмические события являются самыми сильными за последние 20 лет по величине параметра S среди камчатских землетрясений с промежуточной глубиной очага.

Для анализа изменений сейсмичности перед Жупановским землетрясением были отобраны слабые ($K_s=3.5-10$) тектонические землетрясения, произошедшие в интервале 01.04.2014 г. – 30.01.2016 г. (до момента основного события) в зоне радиусом $L=76$ км от эпицентра землетрясения, где $L=10^{0.44M-1.29}$ – длина очага землетрясения в км. В качестве источника данных о сейсмичности использовался каталог землетрясений Камчатского филиала ГС РАН [5].

Характер полученных при этом данных позволил разделить все землетрясения по глубине гипоцентров на две зоны: до и глубже 50 км. Дальнейшая обработка данных сейсмических наблюдений была ориентирована на выявление изменений в характере слабой сейсмичности, коррелирующих на интервале активной фазы подготовки землетрясения со значимыми изменениями временных рядов данных комплексных геофизических измерений.

На рисунке результаты сейсмических наблюдений на заключительной стадии подготовки Жупановского землетрясения представлены кумулятивной кривой энергетических классов землетрясений с глубиной до 50 км (рисунок, г) и данными по изменениям параметров механизмов очагов землетрясений, произошедших в зоне Авачинского залива (рисунок, д-е).

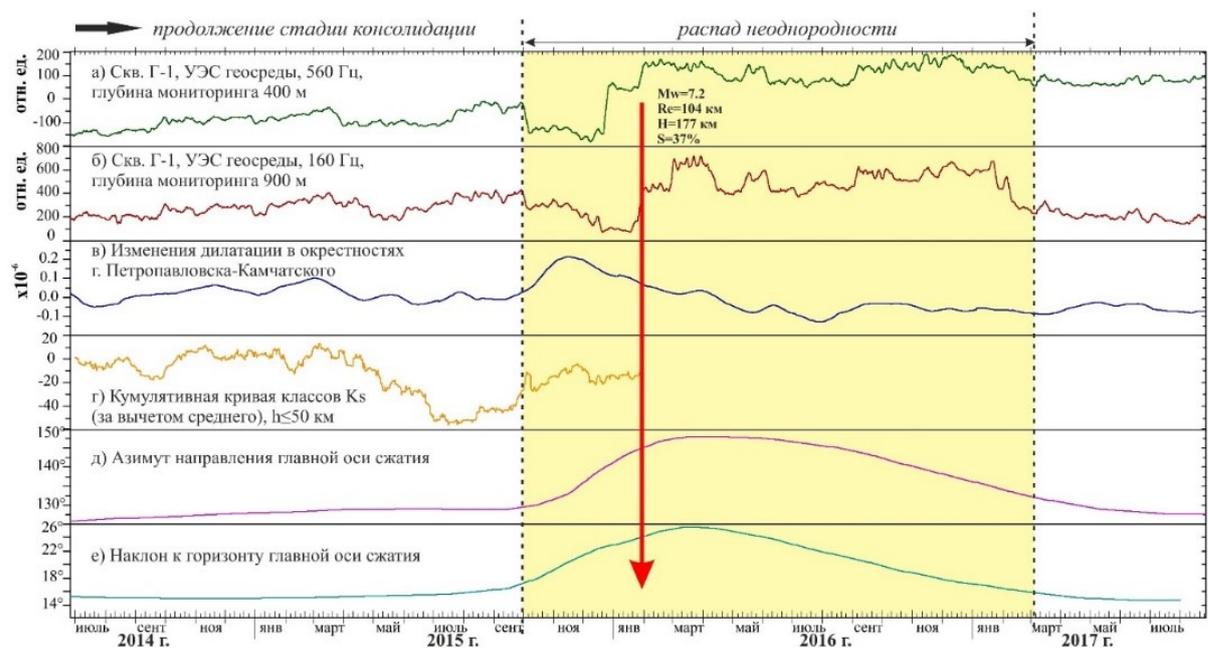


Рисунок. Изменения удельного сопротивления (УЭС) геосреды в зоне скважины Г-1 в сравнении с изменениями параметров механизмов очагов землетрясений, данными по сейсмичности и дилатации в зоне ППП во временной окрестности Жупановского землетрясения: а, б – изменения УЭС геосреды в зоне скважины Г-1 на глубинах до 400 м и 900 м соответственно; в – изменения ряда плоской дилатации в окрестностях ППП; г – кумулятивная кривая энергетических классов K_s за вычетом среднего значения для землетрясений с глубиной до 50 км; д – азимут направления главной оси сжатия, е – наклон к горизонту главной оси сжатия, определенные по данным о механизмах очагов землетрясений в Авачинском заливе.

Сопоставление указанных временных рядов с данными по изменениям удельного электрического сопротивления (УЭС) геосреды в зоне ППП на разных глубинах (рисунок, а-б) и с данными по изменениям дилатации в районе

г. Петропавловска-Камчатского (рисунок, в) [7] позволяет сделать несколько важных выводов.

1. В данном случае можно уверенно говорить о согласовании на заключительной стадии подготовки Жупановского землетрясения результатов сейсмических наблюдений с результатами скважинного электромагнитного мониторинга и данными ГНСС наблюдений.

2. Изменения всех временных рядов на интервале октябрь 2015 г. – март 2017 г. соответствуют консолидационной модели подготовки сильного землетрясения И.П. Добровольского [4], предполагающей на заключительной стадии распад жесткой неоднородности.

3. Несомненно важным является яркий результат (см. рисунок, д-е), указывающий на то, что примерно за 4 месяца до момента землетрясения в зоне Авачинского залива были зарегистрированы землетрясения с нетипичными механизмами очагов. Можно предположить, что в этом случае речь может идти о землетрясениях, связанных с распадом неоднородности. На это фактически указывает синхронность роста числа землетрясений с нетипичными механизмами очагов (см. рисунок, д-е) и рост амплитуды кумулятивной кривой (см. рисунок, г).

4. В целом представленные результаты показывают, что привлечение данных сейсмических наблюдений к анализу результатов комплексных скважинных измерений может ощутимо повысить эффективность функционирующей на ППП системы мониторинга процессов подготовки сильных камчатских землетрясений.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 23-27-00352 (<https://rscf.ru/project/23-27-00352/>).

Работа выполнена с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>).

Список литературы

1. *Гаврилов В.А.* Воздействие переменных электромагнитных полей на геоакустические процессы: эмпирические закономерности и физические механизмы. Дис. на соиск. уч. ст. докт. физ.-мат. наук. Москва, 2017. 385 с.
2. *Гаврилов В.А., Децеровский А.В., Власов Ю.А. и др.* Сеть комплексных скважинных измерений Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона // Сейсмические приборы. 2021. Т. 57. № 3. С. 52-78.
3. *Гаврилов В.А., Ландер А.В., Морозова Ю.В.* Сопоставление данных скважинных геоакустических и электромагнитных землетрясений с данными по механизмам очагов землетрясений // Доклады Академии наук. 2019. Т. 484. № 6. С. 745-749.
4. *Добровольский И.П.* Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 240 с.
5. Единая информационная система данных КФ ФИЦ ЕГС РАН. Каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов. <http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php>
6. *Ризниченко Ю.В.* Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент. М.: Наука. Исследования по физике очага землетрясения, 1976. С. 9-27.
7. *Gavrilov V.A., Poltavtseva E.V., Titkov N.N. et al.* Monitoring of Changes in the Stress-Strain State of Geoenvironment at the Petropavlovsk Geodynamic Testing Site Based on the Multi-Instrumental Borehole and GPS Data during the Active Phase of Preparing the Zhupanovsky Earthquake (January 30, 2016, Mw 7.2) // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2023. V. 14. № 6. Art. 0732. DOI: 10.5800/GT-2023-14-6-0732