

О целесообразности использования данных Камчатской сети GPS-измерений для повышения эффективности мониторинга процессов подготовки сильных камчатских землетрясений

Гаврилов В.А.¹, Полтавцева Е.В.¹, Пантелеев И.А.³, Титков Н.Н.², Бусс Ю.Ю.¹, Артамонова И.Е.¹

On the expediency of using Kamchatka GPS network data to enhance the efficiency of monitoring the processes of strong Kamchatka earthquakes preparation

Gavrilov V.A., Poltavtseva E.V., Panteleev I.A., Titkov N.N., Buss Yu.Yu., Artamonova I.E.

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;
e-mail: kianara@mail.ru*

² *Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», г. Петропавловск-Камчатский*

³ *Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь*

В работе приводится сопоставление результатов комплексного скважинного мониторинга и ряда дилатации, рассчитанного по данным Камчатской сети GPS-измерений на интервале активной фазы подготовки Жупановского землетрясения.

В настоящее время подготовка регулярных (в обычном режиме – каждые две недели) заключений о текущей сейсмической опасности для района г. Петропавловск-Камчатский проводится Институтом вулканологии и сейсмологии ДВО РАН на основе данных Сети комплексных скважинных измерений Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона (ППП). Основные измерения на пунктах Сети осуществляются с использованием датчиков, установленных в глубоких скважинах, что позволяет получать научные результаты, недостижимые при выполнении измерений на земной поверхности. Другой важной особенностью Сети является комплексность проводимых измерений – в настоящее время для мониторинга процессов подготовки сильных камчатских землетрясений используются данные девяти видов измерений (более 60 измерительных каналов) [5]. Как показывает многолетний опыт исследований, используемые при этом методы мониторинга хорошо дополняют друг друга, позволяя в большинстве случаев исключать неоднозначность в интерпретации получаемых результатов.

Между тем, нельзя не учитывать сложный многостадийный характер подготовки сильных землетрясений, а также важность и ответственный характер задач прогнозирования сильных камчатских землетрясений. По этим причинам в ряде случаев представляется необходимым привлечение к анализу результатов скважинного мониторинга геосреды данных других видов измерений. В этой связи, в целях оценки целесообразности использования данных Камчатской сети GPS-измерений авторами был проведен сравнительный анализ результатов комплексных скважинных измерений на ППП и данных Камчатской сети GPS-измерений, полученных во временной окрестности Жупановского землетрясения (30.01.2016 г.; $M_W=7.2$, $Re=104$ км, $H=177$ км) – наиболее сильного с 2000 г. сейсмического события по величине отношения длины очага землетрясения к гипоцентральному расстоянию. На рис. 1 представлены результаты электромагнитных и геоакустических скважинных измерений (скважина Г-1 ППП) в сравнении с временным рядом дилатации, данные которого отражают относительные изменения площади треугольника, составленного из пунктов Петропавловского сегмента Камчатской сети GPS-измерений (см. рис. 3). Предполагается, что изменения дилатации в определенной мере обусловлены воздействием деформационных процессов, связанных с подготовкой Жупановского землетрясения. Положительные значения дилатации указывают на растяжение геосреды в зоне измерений, отрицательные – на ее сжатие. Из представленных на рис. 1 данных можно видеть, что начало активной фазы – временного интервала, для которого характерны аномально быстрые и значительные изменения напряженно-

деформированного состояния (НДС) геосреды в зоне измерений, связанные с подготовкой землетрясения – относятся к началу марта 2015 г. Характер изменений данных электромагнитных (рис. 1а) и геоакустических (рис. 1б) скважинных измерений в районе ППП на начальной стадии активной фазы (стадия II, март – середина сентября 2015 г.) соответствует сжатию геосреды в районе ППП [5].

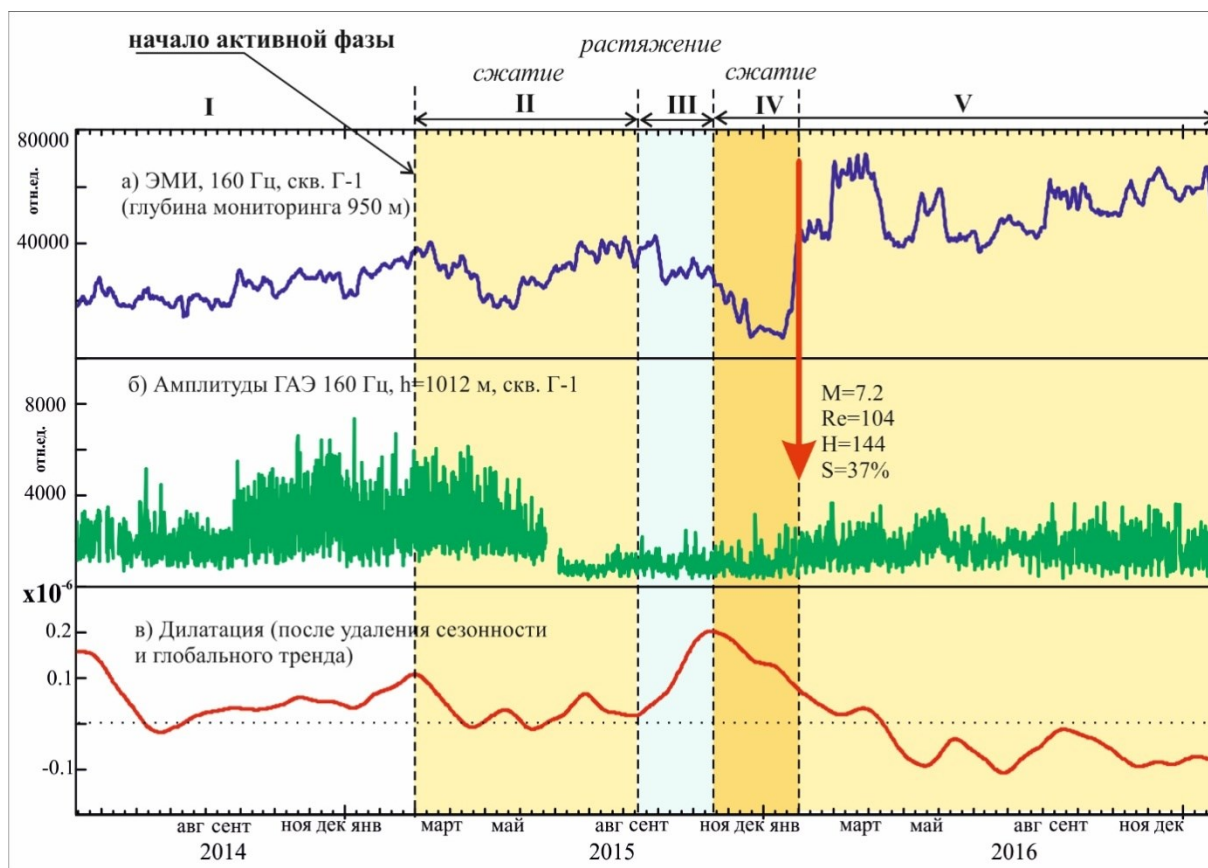


Рис. 1. Данные электромагнитных (а) и геоакустических (б) скважинных измерений в районе ППП в сравнении с рядом дилатации (в).

Данные по изменениям дилатации (рис 1в) на стадии II также указывают на относительное сжатие геосреды в зоне Петропавловского сегмента Камчатской сети GPS-измерений. По характеру изменений на последующих стадиях (стадии III и IV) данные по изменениям дилатации также соответствуют данным скважинных измерений.

В рамках проводимых исследований были сделаны количественные теоретические оценки величин деформаций на интервале активной фазы Жупановского землетрясения для района ППП. Для расчетов была использована модель консолидации И.П. Добровольского [1]. Согласно этой модели, очаг будущего землетрясения представляет собой шаровую неоднородность упругих свойств радиуса R в упругом полупространстве, залегающую на глубине H (глубина землетрясения); $R=10^{0.44M-1.696}$, км [3]; M – магнитуда события, вычисленная по сейсмическому моменту.

Размер полученной в процессе решения зоны растяжения/сжатия может дать представление о возможном гипоцентральной расстоянии, на котором изменения геофизических полей будут достаточно значимыми для краткосрочного прогнозирования сильных сейсмических событий (согласно модели, это значения деформации, превышающие пороговый уровень приливных деформаций 10^{-8}). Кроме того, становится возможным проведение количественной оценки деформаций перед сильным событием непосредственно в зоне расположения пунктов комплексного скважинного мониторинга. Необходимо отметить, что в случае упругопластических

свойств геосреды для землетрясений с промежуточной глубиной очага, к которым относится Жупановское событие, количественные оценки деформации по модели И.П. Добровольского будут оценками снизу (минорантными оценками) [2]. В рамках выбранной модели принимается гипотеза о том, что область подготовки очага будущего землетрясения (шаровая неоднородность) отличается от окружающих ее пород только модулем сдвига. Тогда возмущение НДС геосреды, вызванное появлением неоднородности упругих свойств, задается решением задачи Эшелби о шаровой неоднородности в упругом полупространстве [4] – выражением для объемной деформации упругого полупространства с шаровой неоднородностью, полученным в работе [6]:

$$\varepsilon = 2(1 - 2\nu)Gxy \left(\left[\frac{1}{r_1^5} \right] + \frac{3-4\nu}{r_2^5} - \frac{10H(z+H)}{r_2^7} + 2R^2 \left(\frac{7(z+H)^2}{r_2^9} - \frac{1}{r_2^7} \right) \right). \quad (1)$$

Здесь $G = \frac{\alpha\tau R^3}{2\pi\mu(1-\nu)}$, $r_1 = \sqrt{x^2 + y^2 + (z - H)^2}$, $r_2 = \sqrt{x^2 + y^2 + (z + H)^2}$, α – относительное изменение модуля сдвига в неоднородности; μ – модуль напряжения сдвига среды, Па; ν – коэффициент Пуассона; τ – касательные напряжения на бесконечности, Па; H – глубина землетрясения, км; R – радиус неоднородности. Слагаемое в квадратных скобках имеет место только вне однородности.

Кроме вышеуказанных параметров, в выражении (1) используется напряжение сдвига $\mu=200$ МПа. На рис. 2 показаны изоповерхности такого решения, имеющие сложную форму, навязанную земной поверхностью, свободной от напряжений, и симметричные относительно двух биссекторных плоскостей октантов 5-7 и октантов 6-8. Решение в соседних плоскостях, описывающее объемную деформацию сжатия и расширения, отличается только знаком. Полученный линейный размер одного из «лепестков» изоповерхности объемной деформации $\varepsilon=\pm 10^{-7}$ (см. рис. 2) составляет около 169 км. При этом эпицентральное расстояние до скважины Г-1 ПГП для Жупановского землетрясения составляет 104 км.

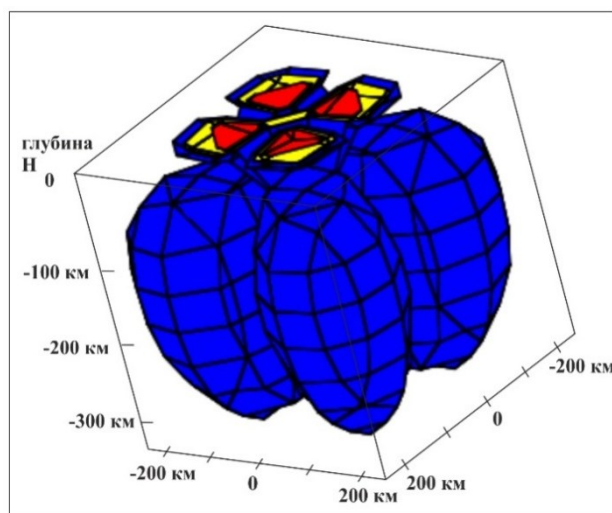


Рис. 2. Изоповерхности объемной деформации для величин деформации $\pm 10^{-7}$ (синий), $\pm 2 \cdot 10^{-7}$ (желтый), $\pm 3 \cdot 10^{-7}$ (красный).

Как можно видеть на рис. 3, район ПГП на интервале активной фазы находился в зоне относительного сжатия с деформациями от $-3.5 \cdot 10^{-7}$ до $-2 \cdot 10^{-7}$.

Полученные оценки величины деформации совпадают с амплитудой ряда дилатации на заключительной стадии подготовки землетрясения (стадии IV на рис. 1) и более чем на порядок превышают пороговые значения $\pm 10^{-8}$.

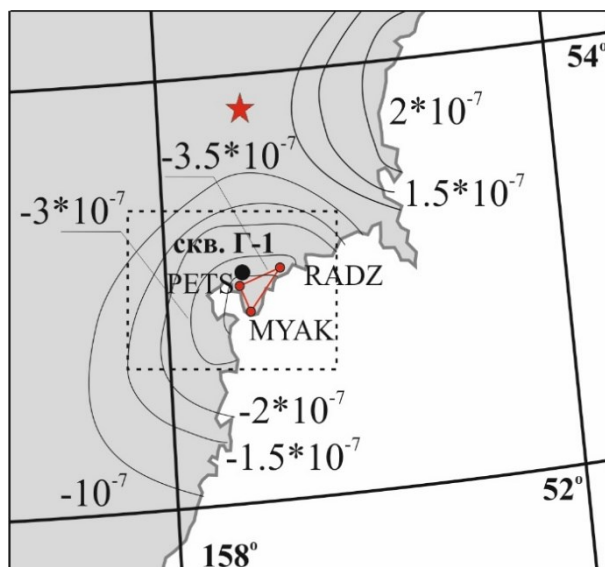


Рис. 3. Изолинии на земной поверхности объемной деформации $\pm 10^{-7}$, $\pm 1.5 \cdot 10^{-7}$, $\pm 2 \cdot 10^{-7}$, $\pm 3 \cdot 10^{-7}$ и $\pm 3.5 \cdot 10^{-7}$. Пунктиром обозначена зона ПП. Звездочкой обозначен эпицентр Жупановского землетрясения. Черный кружок – расположение скважины Г-1. PETS, RADZ, MYAK – пункты Петропавловского сегмента Камчатской сети GPS-измерений, по данным которых строился ряд дилатации.

Полученные результаты показывают, что привлечение данных Камчатской сети GPS-измерений целесообразно для повышения эффективности Сети мониторинга процессов подготовки сильных близких камчатских землетрясений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 23-27-00352).

Список литературы

1. Добровольский И.П. Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. М.: Физматлит, 2009. 240 с.
2. Ребецкий Ю.Л., Лермонтова А.С. О проблеме далекодействующего влияния очагов землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2018. № 5. С. 1-14.
3. Ризниченко Ю.В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент. М.: Наука. Исследования по физике очага землетрясения, 1976. С.9-18.
4. Eshelby J.D. The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems // Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. 1957. V. 241. № 1226. P. 376-396. <http://doi.org/10.1098/rspa.1957.0133>
5. Gavrilov V.A., Deshcherevskii A.V., Vlasov Y.A. et al. Network of multidisciplinary borehole measurements at the Petropavlovsk-Kamchatsky geodynamic testing area // Seismic Instruments. 2022. V. 58. P. 121-138. <https://doi.org/10.3103/S0747923922020050>
6. Panteleev I.A., Poltavceva E.V., Mubassarova V.A., Gavrilov V.A. Perturbation of the stress-strain state of an elastic half-space by the spherical inhomogeneity of elastic properties under shear in horizontal plane taking account of gravitational forces // PNRPU Mechanics Bulletin. 2017. № 4. P. 138-153. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2017.4.10>