



**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)**

V.A. Gavrilov <sup>1</sup>✉, E.V. Poltavtseva <sup>1</sup>, N.N. Titkov <sup>2</sup>, I.A. Panteleev <sup>3</sup>, Yu.Yu. Buss <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences, 9 Piip Blvd, Petropavlovsk-Kamchatsky 683006, Russia

<sup>2</sup>Kamchatka Branch of the Federal Research Center of the Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, 9 Piip Blvd, Petropavlovsk-Kamchatsky 683006, Russia

<sup>3</sup>Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 1 Academician Korolev St, Perm 614990, Russia

**ABSTRACT.** The paper presents the results of comparative analysis of the data regarding the multi-instrumental borehole monitoring data of changes in the geoenvironment stress-strain state and GPS data obtained in the time vicinity of the close strong Zhupanovsky earthquake. The purpose this study was to assess the feasibility of using GPS measurements on routine basis for effective monitoring of strong Kamchatka earthquakes in the area of Petropavlovsk-Kamchatsky. The Zhupanovsky earthquake active phase was chosen as a "test" time interval for comparing GPS and borehole monitoring data. This earthquake has been the strongest seismic event since 2000 in terms of the ratio of the earthquake focus length to the hypocentral distance. The time series borehole electromagnetic and geoacoustic data were compared with the dilatation series reflecting the relative changes in the area of a triangle composed of Kamchatka GPS observation network located in the Petropavlovsk geodynamic testing site. The analysis indicates a high degree of consistency in these time series. GPS data obtained during the active phase of the earthquake preparation is agree with the results of mathematical modeling expected values of volumetric strain on the daylight surface on the eve of the earthquake. A joint analysis of borehole and GPS data made it possible to specify the time limits for the stages of change in the stress-strain state of geoenvironment and to resolve ambiguity of interpretation of the electromagnetic and geoacoustic borehole measurement results at the final stage of preparing the Zhupanovsky earthquake.

**KEYWORDS:** multi-instrumental borehole monitoring; stress-strain state of the geoenvironment; GPS measurements; deformation; Zhupanovsky earthquake

**FUNDING:** The work was supported by RSF (project 23-27-00352).

**RESEARCH ARTICLE**

**Correspondence:** Valery A. Gavrilov, [vgavr1403@mail.ru](mailto:vgavr1403@mail.ru)

Received: April 11, 2023

Revised: May 24, 2023

Accepted: June 14, 2023

**FOR CITATION:** Gavrilov V.A., Poltavtseva E.V., Titkov N.N., Panteleev I.A., Buss Yu.Yu., 2023. 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* 14 (6), 0732. doi:10.5800/GT-2023-14-6-0732

# МОНИТОРИНГ ИЗМЕНЕНИЙ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГЕОСРЕДЫ В РАЙОНЕ ПЕТРОПАВЛОВСКОГО ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ПОЛИГОНА ПО ДАННЫМ КОМПЛЕКСНЫХ СКВАЖИННЫХ И GPS-ИЗМЕРЕНИЙ НА АКТИВНОЙ ФАЗЕ ПОДГОТОВКИ ЖУПАНОВСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ (30.01.2016; Mw=7.2)

В.А. Гаврилов<sup>1</sup>, Е.В. Полтавцева<sup>1</sup>, Н.Н. Титков<sup>2</sup>, И.А. Пантелеев<sup>3</sup>, Ю.Ю. Бусс<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 683006, Петропавловск-Камчатский, б-р Пийпа, 9, Россия

<sup>2</sup> Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, 683006, Петропавловск-Камчатский, б-р Пийпа, 9, Россия

<sup>3</sup> Институт механики сплошных сред УрО РАН, 614990, Пермь, ул. Академика Королева, 1, Россия

**АННОТАЦИЯ.** Приводятся результаты сравнительного анализа данных комплексного скважинного мониторинга изменений напряженно-деформированного состояния геосреды и данных GPS-измерений, полученных во временной окрестности сильного близкого Жупановского землетрясения. Целью исследований являлась оценка целесообразности привлечения на постоянной основе данных GPS-измерений для повышения эффективности системы мониторинга процессов подготовки сильных камчатских землетрясений, функционирующей в районе г. Петропавловска-Камчатского. В качестве «тестового» временного интервала для сравнения данных GPS-измерений с результатами комплексного скважинного мониторинга был выбран интервал активной фазы подготовки Жупановского землетрясения – самого сильного с 2000 г. сейсмического события по величине отношения длины очага землетрясения к гипоцентральному расстоянию. В ходе анализа временные ряды данных скважинных электромагнитных и геоакустических измерений в районе Петропавловского геодинамического полигона сравнивались с рядом дилатации, данные которого отражают относительные изменения площади треугольника, составленного из пунктов Камчатской сети GPS-измерений, расположенных в том же районе. Результаты анализа свидетельствуют о высокой степени согласованности указанных временных рядов. Значимость исходных данных GPS-измерений, полученных на интервале активной фазы подготовки землетрясения, подтверждается их совпадением с оценками ожидаемых величин объемных деформаций на дневной поверхности накануне момента землетрясения, полученными по результатам математического моделирования. Совместный анализ данных скважинных и GPS-измерений позволил уточнить временные границы стадий изменений напряженно-деформированного состояния геосреды, а также устранить неоднозначность в интерпретации результатов электромагнитных и геоакустических скважинных измерений на заключительных стадиях подготовки Жупановского землетрясения.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** комплексный скважинный мониторинг; напряженно-деформированное состояние геосреды; GPS-измерения; деформации; Жупановское землетрясение

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

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Возможность достаточно надежного краткосрочного прогнозирования времени сильных землетрясений в настоящее время продолжает оставаться темой острых дискуссий [Koronovsky et al., 2019, 2021]. Тем не менее становится понятно, что, несмотря на сложность строения реальной геосреды и протекающих в ней процессов, успешные краткосрочные прогнозы землетрясений возможны, хотя и с серьезными принципиальными ограничениями на их точность [Bogomolov, Sycheva, 2022].

Сторонники невозможности успешного краткосрочного прогнозирования сильных землетрясений ссылаются, прежде всего, на сложность строения реальной геосреды и протекающих в ней процессов. Это действительно так. Однако, как показывают результаты исследований на хорошо оснащенных геодинамических полигонах [Lyubushin, 2007, 2008, 2009, 2011, 2013], в зоне подготовки сильного тектонического землетрясения происходит осреднение свойств огромных

объемов геосреды, что значительно упрощает решение задач краткосрочного прогнозирования близких землетрясений. Выделение начала таких процессов и их последующий непрерывный мониторинг возможны при наличии в районе проводимых исследований достаточно развитой системы мониторинга изменений напряженно-деформированного состояния (НДС) геосреды, связанных с подготовкой сильных близких землетрясений. Фактически наличие такой системы является ключевым необходимым условием решения задач успешного краткосрочного прогнозирования сильных близких землетрясений (время упреждения – до нескольких недель).

В проводимых на Камчатке исследованиях, связанных с краткосрочным прогнозированием сильных местных землетрясений, в настоящее время используются, в первую очередь, данные геофизических наблюдений, среди которых с учетом эффективности можно выделить мониторинг динамики объемной активности радона [Firstov, Makarov, 2018], наземный мониторинг

состояния ионосферы [Bogdanov et al., 2017; Bogdanov, Pavlov, 2018], мониторинг изменений уровня, дебита и химического состава воды скважин [Kopylova, Boldina, 2019; Ryabinin, Khatkevich, 2009], комплексные скважинные измерения [Gavrilov et al., 2022].

Касаясь комплексных скважинных измерений, следует отметить, что в этом случае для непрерывного мониторинга изменений НДС геосреды используются данные девяти видов измерений [Gavrilov et al., 2022]. Анализ полученных при этом результатов показывает, что в большинстве случаев перед сильными камчатскими землетрясениями достаточно уверенно выделяется временной интервал продолжительностью до десяти месяцев, начало которого означает переход геосреды в зоне измерений из фонового состояния в «активную фазу», способную завершиться сильным сейсмическим событием [Gavrilov, Naumov, 2017; Gavrilov et al., 2006, 2008, 2019a, 2019b; Gavrilov, Buss, 2015; Gavrilov, 2017]. С 2014 г. Институтом вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН на основе многолетних рядов данных Сети комплексных скважинных измерений, функционирующей на Петропавловском геодинамическом полигоне (ППП), регулярно (в обычном режиме – каждые две недели) подготавливаются прогнозные заключения о текущей сейсмической опасности [Gavrilov et al., 2022]. Основные измерения на пунктах Сети проводятся с использованием датчиков, установленных в глубоких скважинах, что позволяет получать научные результаты, недостижимые при измерениях 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. Базовыми являются скважинные геоакустические измерения и электромагнитные измерения с подземными электрическими антеннами. На основе данных этих видов измерений удалось разработать высокоэффективные оригинальные методы мониторинга изменений НДС геосреды (ГАЭ-метод, ЭМИ-метод и др.), успешно используемые для средне- и краткосрочного прогноза сильных камчатских землетрясений [Gavrilov, 2014, 2017; Gavrilov, Naumov, 2017]. Успешные прогнозы ряда сильных камчатских землетрясений, сделанные на основе данных, получаемых Сетью, показывают, что в целом по составу проводимых измерений и используемых методов мониторинга НДС геосреды Сеть соответствует решаемым задачам. Как показывает многолетний опыт исследований на ППП, используемые методы мониторинга хорошо дополняют друг друга, позволяя в большинстве случаев исключать неоднозначность в интерпретации получаемых результатов. В то же время нельзя не учитывать, что подготовка сильных землетрясений носит сложный многостадийный характер, а правильная интерпретация данных комплексного мониторинга НДС геосреды в режиме реального времени является сложной задачей, где вероятность ошибки достаточно велика. Для минимизации

таких ошибок представляется целесообразным привлечение к анализу результатов комплексного скважинного мониторинга НДС геосреды также данных дополнительных видов измерений, проводимых в том же районе.

Настоящая статья посвящена сравнительному анализу данных комплексного скважинного мониторинга изменений НДС геосреды и данных GPS-измерений, полученных во временной окрестности сильного близкого Жупановского землетрясения (30.01.2016; Mw=7.2; Re=104 км, H=177 км). Предполагается, что сопоставление результатов скважинных геоакустических и электромагнитных измерений с результатами прямых деформационных GPS-измерений на земной поверхности позволит, во-первых, провести независимую верификацию результатов мониторинга НДС геосреды, полученных на базе ГАЭ- и ЭМИ-методов. Во-вторых, это позволит оценить целесообразность привлечения на постоянной основе данных GPS-измерений для повышения эффективности функционирующей в районе ППП системы мониторинга процессов подготовки сильных близких камчатских землетрясений.

## 2. СЕТЬ КОМПЛЕКСНЫХ СКВАЖИННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПЕТРОПАВЛОВСКОГО ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ПОЛИГОНА

Сеть комплексных скважинных измерений ППП создавалась, в первую очередь, для обеспечения непрерывного мониторинга изменений НДС геосреды, связанных с подготовкой сильных камчатских землетрясений, опасных для г. Петропавловска-Камчатского и расположенных поблизости городов Елизово и Вилючинск, находящихся в зоне 9-балльных возможных сотрясений. Начало создания Сети – август 2000 г. В настоящее время в состав Сети входят пять радиотелеметрических пунктов, созданных на базе скважин Г-1, Р-2, Е-1, К-33, ГК-1, и Центр сбора и обработки информации, расположенный в здании ИВиС ДВО РАН в г. Петропавловске-Камчатском (рис. 1).

Для мониторинга НДС геосреды в основном используются данные комплексных геофизических измерений, проводимых в достаточно глубоких (до 2542 м) скважинах. В целом для этой цели используются данные девяти видов измерений (более 60 измерительных каналов) [Gavrilov et al., 2022].

Основными (базовыми) методами мониторинга являются ГАЭ- и ЭМИ-методы, способные контролировать быстрые изменения интенсивности фильтрации жидкого флюида, связанные с изменением НДС геосреды в районе готовящегося очага.

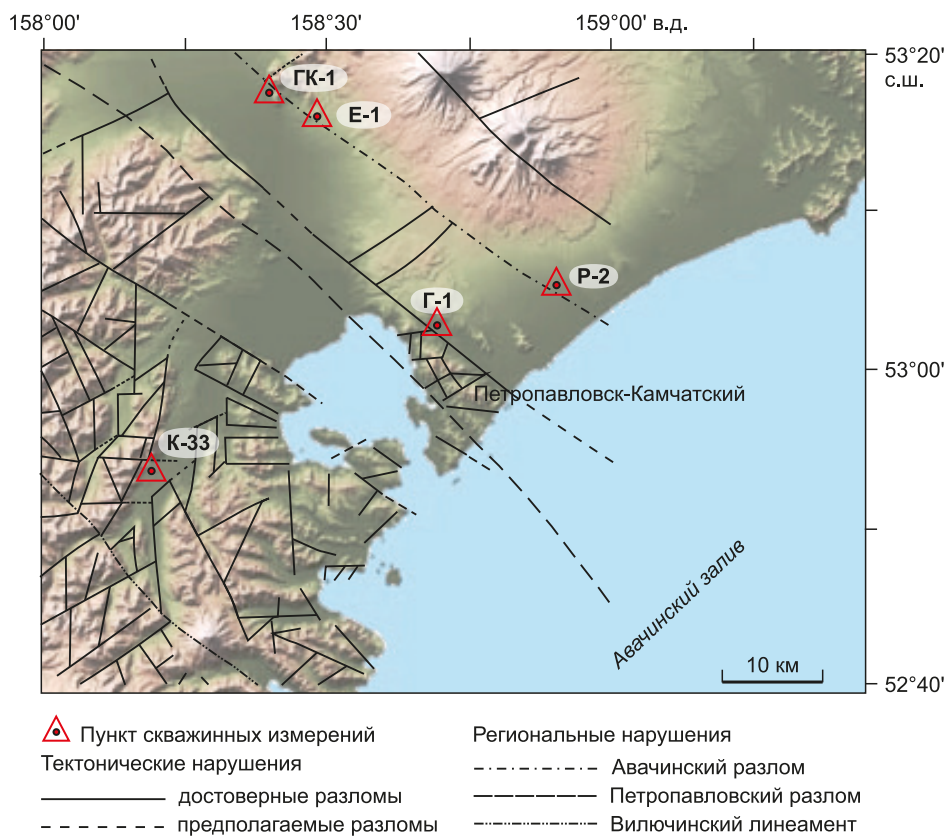
Физической основой ГАЭ-метода является эффект модуляции интенсивности геоакустической эмиссии (ГАЭ), открытый в ходе многолетних исследований на ППП [Gavrilov, 2017; Gavrilov et al., 2020]. Суть указанного эффекта состоит в том, что при достаточной влажности геосреды воздействие на геоакустические процессы слабого электромагнитного излучения (ЭМИ) сверхнизкочастотного диапазона (первые Гц – первые

кГц) с медленно меняющейся амплитудой напряженности электрического поля будет вызывать изменения амплитуды ГАЭ. Так, например, суточные вариации амплитуды напряженности ЭМИ, воздействующего на геосреду, приводят к соответствующим суточным вариациям амплитуды ГАЭ – откликам ГАЭ на воздействие ЭМИ. Предполагаемый физический механизм указанного эффекта изложен в работах [Gavrilov, 2017; Gavrilov, Naumov, 2017], где показывается, что амплитуда откликов ГАЭ на воздействие ЭМИ определяется амплитудой напряженности ЭМИ и общей площадью соприкосновения жидкой и твердой фаз в контролируемом геофоном объеме геосреды. Интенсификация фильтрационных процессов на активной стадии подготовки землетрясения приводит к изменениям площади соприкосновения жидкой и твердой фаз для значительных объемов геосреды и соответствующим изменениям амплитуд ГАЭ.

Проведение геоакустических измерений на глубинах более 300 м позволяет значительно снизить влияние шумов дневной поверхности, а также обеспечить мониторинг изменений влажности для достаточно большого объема геосреды. К примеру, установка геофона на глубине около 1000 м в скважине Г-1, расположенной на территории ПГП, позволила на 46 дБ (в 200 раз) снизить влияние шумов дневной поверхности

[Gavrilov et al., 2006]. Размеры зоны мониторинга, в пределах которой ГАЭ-метод способен контролировать изменения влажности геосреды, в данном случае можно аппроксимировать сферой с радиусом около 700 м [Gavrilov, 2017].

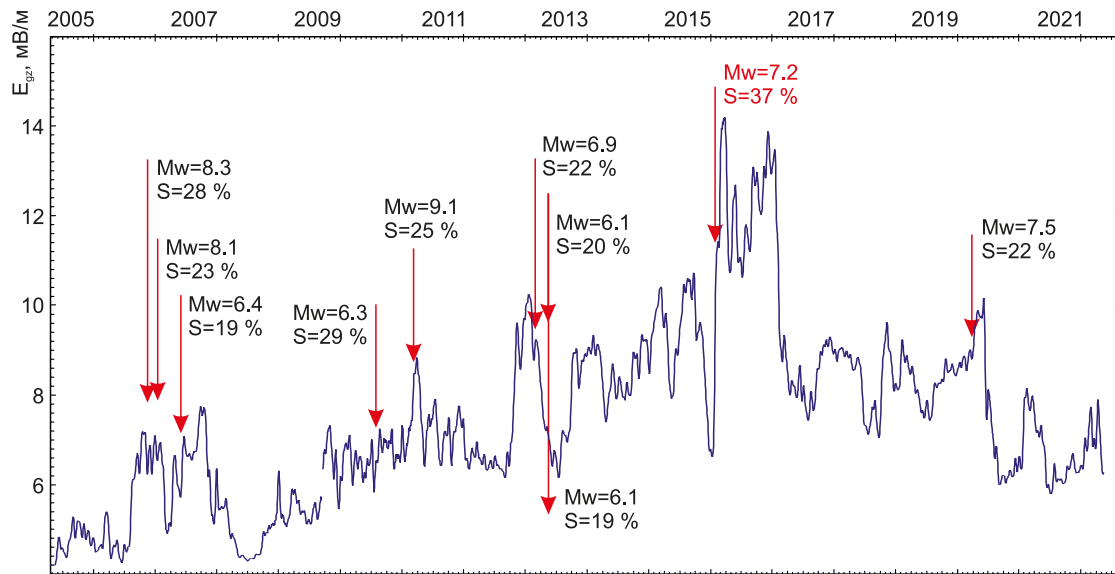
ЭМИ-метод базируется на данных непрерывного мониторинга изменений удельного электрического сопротивления (УЭС) горных пород. При этом в качестве зондирующего сигнала используется непрерывное фоновое электромагнитное излучение техногенного или природного происхождения, а в качестве датчиков – подземные электрические антенны. Основным конструктивным элементом подземной антенны является металлическая обсадная колонна скважин [Gavrilov, 2014]. Физической основой метода является зависимость УЭС горных пород от степени их влажности. Глубина мониторинга изменений УЭС геосреды ЭМИ-методом зависит от частотного диапазона измерений и достигает 2.5 км для частот порядка 30 Гц. На эффективность метода указывают результаты, представленные на рис. 2. Можно видеть, что подготовка всех сильных землетрясений, произошедших в апреле 2005 г. – июле 2022 г., для которых величина  $S=L/R_h \cdot 100$  [%] ( $L$  – длина очага землетрясения [Riznichenko, 1976];  $R_h$  – гипоцентрального расстояние) составляет не менее 19 %, сопровождалась значительными изменениями УЭС. Наиболее



**Рис. 1.** Расположение измерительных пунктов Сети комплексных скважинных измерений Петропавловского геодинамического полигона в сопоставлении со схемой тектонических нарушений.

**Fig. 1.** The location of the borehole network-based measurement sites in the Petropavlovsk geodynamical testing area in comparison with the scheme of tectonic faults.





**Рис. 2.** Изменения УЭС геосреды в зоне скважины Г-1 в сопоставлении с моментами сильных землетрясений с глубиной очага менее 500 км и величиной  $S \geq 19\%$ .

**Fig. 2.** Changes in geoenvironmental resistance in borehole G-1 zone as compared to the moments of strong earthquakes with a focal depth of less than 500 km and  $S \geq 19\%$ .

значимые (более 700 %) изменения УЭС геосреды связаны с подготовкой Жупановского землетрясения (30.01.2016,  $M_w=7.2$ ,  $R_c=104$  км,  $H=177$  км) – самого сильного по величине  $S$  сейсмического события с момента начала скважинных измерений на территории ППП (с 2000 г.).

### 3. СЕТЬ ПОСТОЯННЫХ ГНСС-НАБЛЮДЕНИЙ ПЕТРОПАВЛОВСКОГО ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ПОЛИГОНА

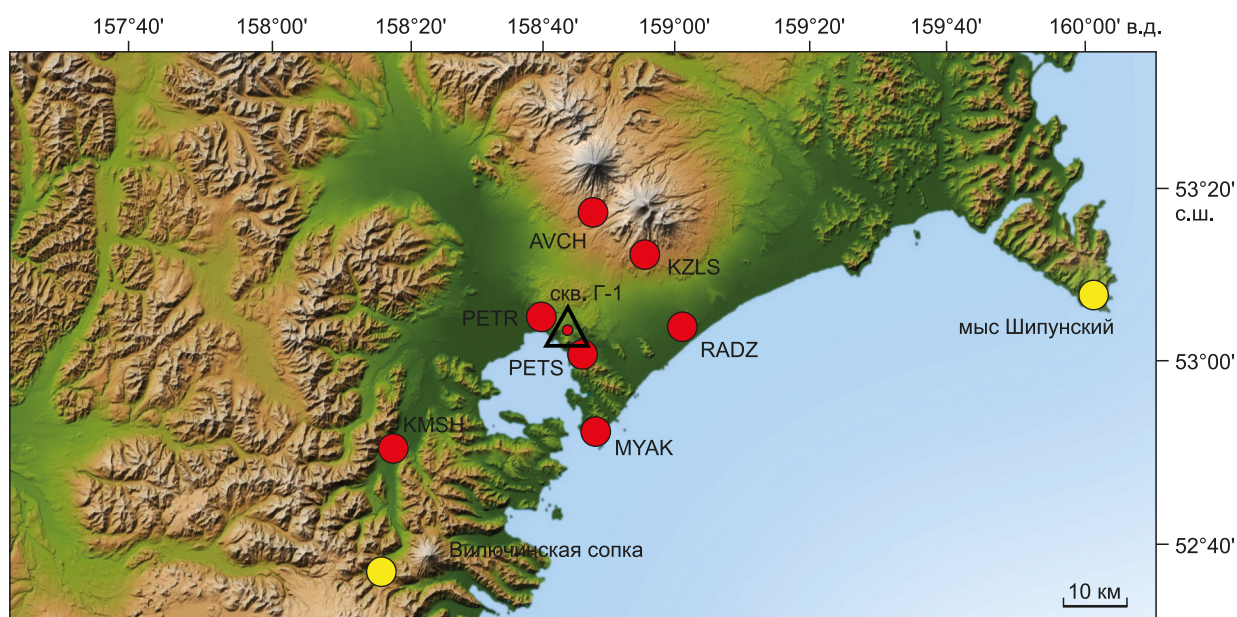
Исследования современных движений земной коры проводятся на Камчатке с начала 70-х годов. На первом этапе использовались классические геодезические методы (трилатерация, нивелирование), главными недостатками которых являются трудоемкость и низкая оперативность проведения высокоточных деформационных измерений на участках земной поверхности, превышающих первые десятки километров. Развитие методов геодезических измерений с использованием глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) позволило проводить высокоточный непрерывный деформационный мониторинг движений земной коры на участках любых размеров.

Сеть постоянных ГНСС-наблюдений Камчатского филиала Геофизической службы (КФ ГС) РАН начала функционировать в октябре 1997 г., имея в своем составе восемь станций [Levin et al., 2014]. Сеть создавалась для изучения геодезических процессов, связанных с движением тектонических плит и блоков, а также для регистрации деформационных проявлений сейсмической и вулканической активности Камчатки и Командорских островов.

В настоящее время в состав сети входит 30 станций. Сеть охватывает всю территорию Камчатского края.

В районах г. Петропавловска-Камчатского и Ключевской группы вулканов сеть сгущена, образует локальные геодезические полигоны. Станции работают в автоматическом, не требующем вмешательства оператора режиме, и подключены, за редким исключением, к каналам передачи данных. Станции комплектуются двухчастотными ГНСС-приемниками и антеннами с отражателями, позволяющими снизить эффект многолучевости. Геодезические центры заложены в основном на отдельно стоящих железобетонных пилонах, в редких случаях – на крышах малоэтажных зданий. Закладка геодезических центров выполнена с максимальным приближением к требованиям, предъявляемым к пунктам фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС). Регистрация данных, передаваемых спутниками ГНСС, производится станциями сети с интервалом 1 с. Ежедневно в автоматическом режиме компьютером системы сбора данных (ССД) выполняется скачивание исходных данных станций сети и перемещение их в структурированный архив для последующей обработки. Перед этим на микрокомпьютерах станций или на компьютере ССД все исходные данные преобразуются в данные формата RINEX.

Обработка ГНСС-наблюдений выполняется пакетом программ GAMIT/GLOBK [Herring et al., 2018]. Результатами обработки являются осредненные за сутки координаты пунктов в отсчетной основе ITRF2014. В зависимости от точности используемых внешних данных, предоставляемых службой IGS (International GNSS Service), задержка определения координат может составлять от получаса до двух недель по окончании суточной сессии наблюдений. Ошибки определения координат составляют первые миллиметры в плане и от 5 мм по высоте. Стабильность геодезических центров



**Рис. 3.** Расположение станций ГНСС на Петропавловском геодинамическом полигоне.

Красными кружками обозначены действующие пункты сети, желтыми – запланированные к оснащению. Треугольник – расположение скважины Г-1.

**Fig. 3.** Location of GNSS stations in the Petropavlovsk geodynamical testing area.

The red circles indicate active network sites, the yellow circles indicate the sites scheduled to be equipped. A triangle is a location of borehole G-1.

**Таблица 1.** Аппаратура, режимы регистрации и передачи данных станций ГНСС КФ ГС РАН на Петропавловском геодинамическом полигоне

**Table 1.** The equipment, recording mode and GNSS data transmission mode operated by KB GS RAS in the Petropavlovsk geodynamical testing area

№	Станции, расположение, координаты	ГНСС-приемник	Система питания	Канал связи	Тип данных, формируемых на станции; формат	Расписание передачи данных, тип
1	AVCH сейсмостанция Авача 53.261°N, 158.742°E	LEICA GR10	Солн. панели 24 В DC	WiFi	Суточные файлы с интервалами записи 1 с, 30 с; RINEX 2.11	Ежесуточно, файл с интервалом записи 1 с
2	KZLS сейсмостанция вулкан Козельский 53.201°N, 158.899°E	JAVAD TRE_G2TH DELTA	Солн. панели 24 В DC	WiFi	Суточный файл с интервалом записи 1 с; Javad	Ежесуточно, файл с интервалом записи 1 с
3	RADZ поселок Радыгино 53.073°N, 158.986°E	TOPCON GP-R1DY	ИБП, 220 AC	GPRS 3G	Суточные файлы с интервалами записи 1 с, 30 с; RINEX 2.11	Ежесуточно, файл с интервалом записи 30 с
4	PETR здание ИВиС 53.066°N, 158.606°E	SPECTRA SP90M	ИБП, 220 AC	локал. сеть	Суточный файл с интервалом записи 1 с; RTCM 3	Ежесуточно, файл с интервалом записи 1 с
5	PETS сейсмостанция Петропавловская 53.023°N, 158.650°E	JAVAD TRE_G3TH	ИБП, 220 AC	локал. сеть	Суточные файлы с интервалами записи 1 с, 30 с; RINEX 2.11	Ежесуточно, файл с интервалом записи 1 с
6	MYAK маяк Петропавловский 52.889°N, 158.707°E	JAVAD Lexon-GGD	БИРП, 24 В DC	WiFi	Суточный файл с интервалом записи 1 с; Javad	Ежесуточно, файл с интервалом записи 1 с
7	KMSH комплексная геофизическая обсерватория Карымшина 52.826°N, 158.131°E	JAVAD TRE_G2T DELTA	БИРП, 24 В DC	WiFi	Суточные файлы с интервалами записи 1 с, 30 с; RINEX 2.11	Ежесуточно, файл с интервалом записи 1 с

можно оценивать по среднеквадратическому отклонению (СКО) для многолетнего ряда наблюдений после вычета линейного тренда, сезонной составляющей и статических смещений, вызванных сейсмическими и вулканическими событиями. СКО для пунктов ГНСС-сети КФ ГС РАН составляет 3.0–4.5 мм в плане и 6–12 мм по высоте.

В настоящее время на территории ПГП расположены семь станций сети ГНСС, функционирующих в непрерывном режиме (рис. 3). Их основные технические характеристики приведены в табл. 1.

#### 4. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ КОМПЛЕКСНЫХ СКВАЖИННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И ДАННЫХ GPS-ИЗМЕРЕНИЙ

Выше указывалось, что Сеть комплексных скважинных измерений ПГП создавалась, в первую очередь, для решения задач краткосрочного прогнозирования сильных близких камчатских землетрясений, опасных для района г. Петропавловска-Камчатского. По этой причине в качестве «тестового» временного интервала для сравнения данных GPS-измерений с результатами комплексных скважинных измерений был выбран интервал активной фазы подготовки Жупановского землетрясения – самого сильного по величине  $S$  сейсмического события с момента начала скважинных измерений на территории ПГП. Вследствие сочетания достаточно высокой магнитуды с относительно небольшим эпицентральной расстоянием до измерительных пунктов ПГП подготовка Жупановского землетрясения в данных скважинных измерений проявилась очень ярко, что позволило ранее [Gavrilov et al., 2019b], на интервале активной фазы его подготовки, достаточно уверенно выделить стадии относительно сжатия и растяжения геосреды в районе ПГП. Для сравнения данных комплексных скважинных измерений с данными GPS-измерений последние представлялись в виде временного ряда плоской дилатации, отражающей относительное изменение площади треугольника, образованного из пунктов PETS, MYAK, RADZ (рис. 3). Такое представление данных GPS-измерений позволяет получить наглядную оценку соответствия их стадиям сжатия и растяжения геосреды в районе ПГП, выделяемым по данным комплексных скважинных измерений. В качестве исходных данных использовались временные ряды смещений в горизонтальной плоскости пунктов PETS, MYAK, RADZ. За горизонтальную плоскость принималась касательная плоскость к референс-эллипсоиду WGS84.

Расчеты деформационных характеристик проводились с использованием скриптов на языке Python версии 3.9. Дилатация определялась как сумма главной диагонали тензора плоской деформации. Определение тензора плоской деформации выполнялось по методике, изложенной в работе [Gerasimenko, 2017]. По результатам расчетов формировался временной ряд среднесуточных значений плоской дилатации треугольника станций PETS, MYAK, RADZ. Из полученного временного

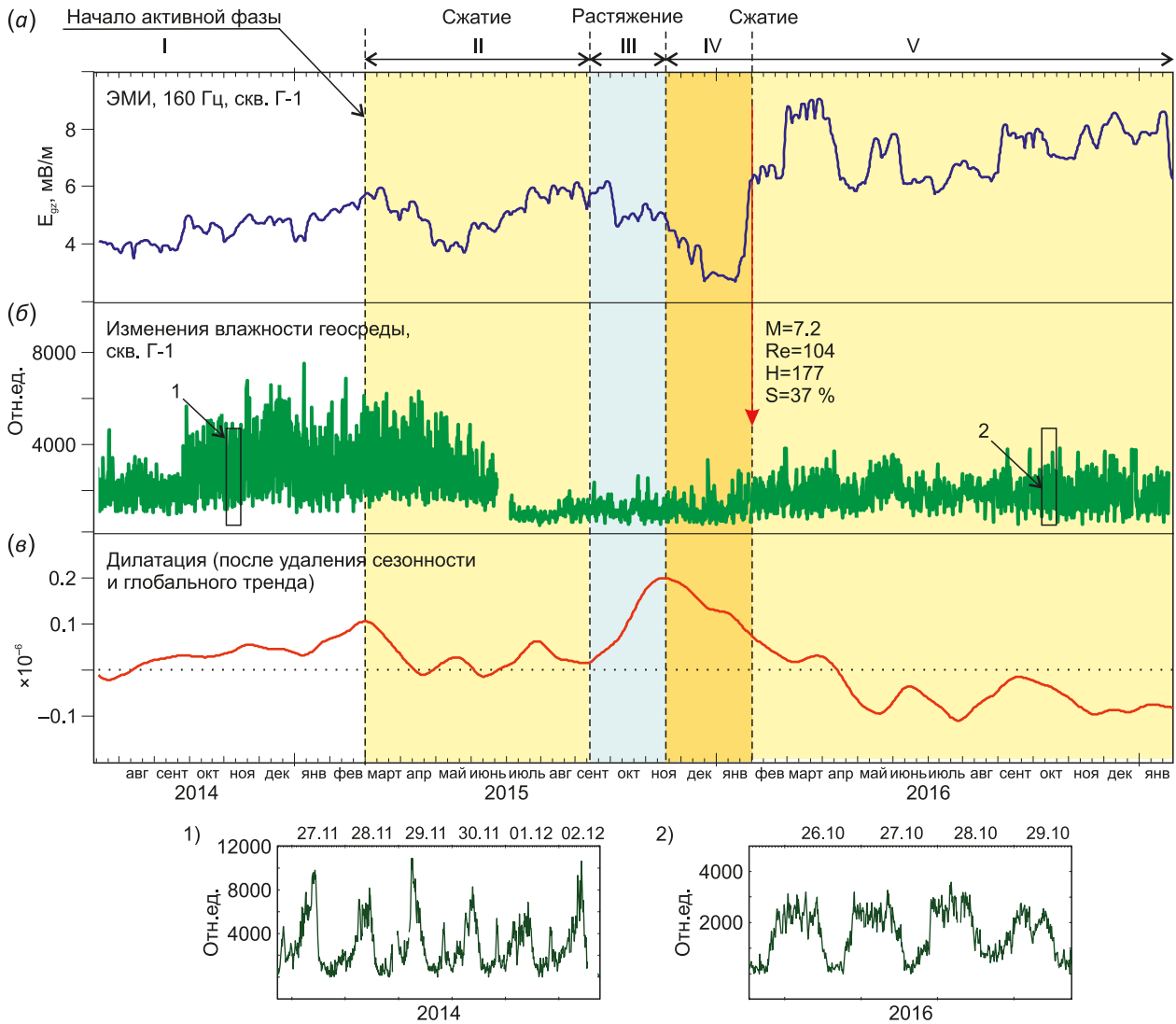
ряда удалялся линейный тренд, обусловленный процессами субдукции в зоне измерений [Gordeev, Pavlov, 2009], и сезонная составляющая, рассчитываемая методом наложения эпох.

Степень соответствия изменений дилатации в районе ПГП результатам комплексных скважинных измерений на интервале активной фазы подготовки Жупановского землетрясения можно оценить по данным рис. 4. Приводимый на рис. 4, а, график показывает изменения УЭС геосреды в зоне ПГП по результатам измерений с подземной электрической антенной [Gavrilov, 2014]. Данные рис. 4, б, отражают изменения влажности геосреды в зоне ПГП по результатам измерений амплитуд откликов ГАЭ на воздействие ЭМИ (см. врезки к рис. 4, б) [Gavrilov, 2017]. Можно видеть, что характер изменений дилатации (рис. 4, в) на стадиях сжатия и растяжения геосреды по своему физическому смыслу соответствует результатам электромагнитных (рис. 4, а) и геоакустических (рис. 4, б) скважинных измерений.

При этом необходимо подчеркнуть, что приводимые на рис. 4 временные границы стадий сжатия и растяжения геосреды были определены по результатам только скважинных измерений [Gavrilov et al., 2019b] задолго до привлечения для этой цели результатов GPS-измерений. В то же время следует отметить, что совместный анализ данных скважинных и GPS-измерений позволил уточнить временные границы указанных стадий, а также устранить неоднозначность в интерпретации результатов электромагнитных и геоакустических скважинных измерений на заключительных стадиях подготовки Жупановского землетрясения.

Для оценки значимости исходных данных GPS-измерений были рассчитаны величины объемных деформаций на земной поверхности, ожидаемых накануне момента землетрясения. Для расчетов была использована модель консолидации И.П. Добровольского [Dobrovolsky, 2009], согласно которой появление краткосрочных предвестников тектонического землетрясения связано с образованием в ходе его подготовки жесткой шаровой неоднородности упругих свойств, центр которой залегает на глубине  $H$  (глубина будущего очага землетрясения). Непосредственно перед землетрясением радиус шаровой неоднородности можно оценить как  $R=10^{0.44M-1.696}$  (км), где  $M$  – магнитуда события, вычисленная по сейсмическому моменту [Dobrovolsky, 2009].

В соответствии с оценками [Dobrovolsky, 2009] принималась гипотеза, согласно которой шаровая неоднородность упругих свойств отличается от окружающих ее пород только модулем сдвига. Момент распада неоднородности при этом ассоциируется с моментом землетрясения. Тогда возмущение НДС геосреды непосредственно перед землетрясением, вызванное появлением неоднородности упругих свойств, задается решением задачи Эшелби о шаровой неоднородности в упругом полупространстве [Eshelby, 1957] – выражением для объемной деформации упругого полупространства



**Рис. 4.** Изменения УЭС геосреды в районе ПГП по данным измерений с подземной электрической антенной (а) и влажности геосреды по данным скважинных геоакустических измерений (б) в сопоставлении с изменениями ряда дилатации (в). Пояснения в тексте.

**Fig. 4.** Changes in geoenvironmental resistance of the Petropavlovsk geodynamical testing area according to the underground antenna data (a) and in geoenvironmental moisture according to the borehole geoacoustic measurement data (b) in comparison with the changes in dilation series (c). See text for explanation.

с шаровой неоднородностью, полученным в работе [Dobrovolsky, 2009]:

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

$$\left. + 2R^2 \left( \frac{7(z + H)^2}{r_2^9} - \frac{1}{r_2^7} \right) \right),$$

где  $G = \frac{\alpha\tau R^3}{2\pi\mu(1 - \nu)}$ ,  $r_1 = \sqrt{x^2 + y^2 + (z - H)^2}$ ,

$r_2 = \sqrt{x^2 + y^2 + (z + H)^2}$ ,  $\alpha$  – относительное изменение модуля сдвига в неоднородности;  $\mu$  – модуль сдвига среды (Па);  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $\tau$  – касательные напряжения сдвига на бесконечности (Па);  $H$  – глубина

очага землетрясения (км);  $R$  – радиус неоднородности. Слагаемое в квадратных скобках имеет место только вне неоднородности. Напряжение сдвига принималось равным  $\tau = 100$  МПа, а модуля сдвига  $\mu = 20$  ГПа.

На рис. 5 показаны изоповерхности, полученные в результате такого решения. Поверхности имеют сложную форму, навязанную дневной поверхностью ( $Z=0$ ), свободной от напряжений, они симметричны относительно двух биссекторных плоскостей октантов 5–7 и октантов 6–8 [Panteleev et al., 2017]. Решение в соседних плоскостях, описывающее объемную деформацию сжатия и растяжения, отличается только знаком. Ориентация симметричных «лепестков» выбиралась относительно нодальной плоскости (северо-западное простирание, азимут простирания  $stk=320^\circ$ ), по которой, согласно [Chebrov et al., 2016], произошел магистральный



разрыв. Линейный размер каждого из «лепестков» изоповерхности объемной деформации  $\epsilon = \pm 10^{-7}$  (рис. 5) составляет 169 км. При этом для Жупановского землетрясения эпицентральное расстояние до скважины Г-1 составило 104 км.

Необходимо отметить, что особенностью Жупановского землетрясения является большая (177 км) глубина очага. Безусловно, геосреду на таких глубинах нельзя считать упругой. Но фактически в рамках решаемой задачи производится не моделирование процессов в зоне очага, а использование упругого решения для оценки величин и знака деформаций, имевших место накануне землетрясения.

Учитывать неупругое деформирование среды на больших глубинах позволяет подход, представленный в работе [Rebetsky, Lermontova, 2018], где показано, что оценки, полученные в упругом случае, являются оценками снизу (минорантными оценками). Это означает, что такие оценки сильно занижены в сравнении с теми, которые были бы получены при учете неупругого деформирования среды. Таким образом, даже в упругом приближении объемные деформации в районе ППГ накануне момента землетрясения были на порядок выше приливных деформаций, причем это были деформации сжатия.

Более точный учет неупругого деформирования и высоких температур геосреды не способен качественно изменить конфигурацию поля объемных деформаций и уменьшить величины оценок деформаций.

Решение (1) при  $Z=0$  позволяет получить оценки абсолютных значений возмущения объемной деформации на земной поверхности, ожидаемых в районе ППГ непосредственно перед моментом землетрясения. На рис. 6 представлены изолинии объемной деформации

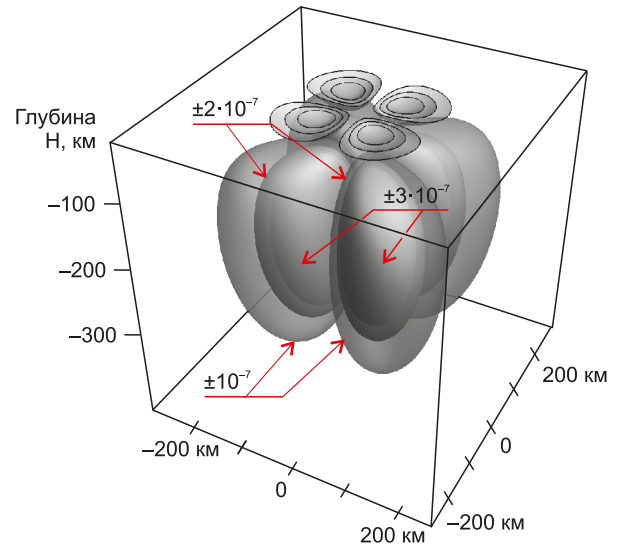


Рис. 5. Изоповерхности объемной деформации для величин деформации  $\pm 10^{-7}$  (внешняя часть),  $\pm 2 \cdot 10^{-7}$   $\pm 3 \cdot 10^{-7}$  (внутренние части).

Fig. 5. Isosurfaces of volumetric deformation for deformation values  $\pm 10^{-7}$  (external part),  $\pm 2 \cdot 10^{-7}$   $\pm 3 \cdot 10^{-7}$  (internal parts).

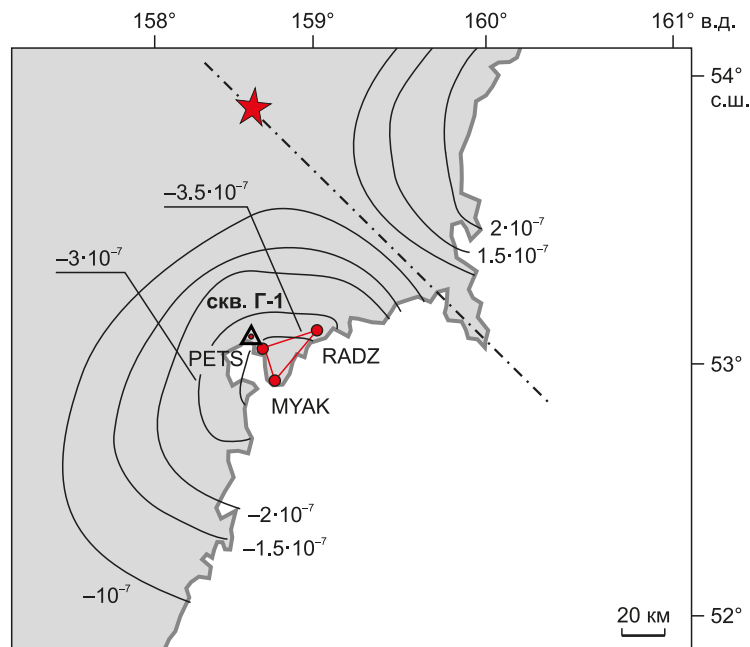


Рис. 6. Изолинии на земной поверхности объемной деформации  $\pm 10^{-7}$ ,  $\pm 1.5 \cdot 10^{-7}$ ,  $\pm 2 \cdot 10^{-7}$ ,  $\pm 3 \cdot 10^{-7}$  и  $\pm 3.5 \cdot 10^{-7}$ . Звездочкой обозначен эпицентр Жупановского землетрясения. Треугольник – расположение скважины Г-1. PETS, RADZ, MYAK – пункты сети ГНСС на ППГ, по данным которых строился ряд дилатации. Штрихпунктирная линия – нодальная плоскость,  $stk=320^\circ$  [Chebrov et al., 2016].

Fig. 6. Isolines on the daylight surface of volumetric deformation  $\pm 10^{-7}$ ,  $\pm 1.5 \cdot 10^{-7}$ ,  $\pm 2 \cdot 10^{-7}$ ,  $\pm 3 \cdot 10^{-7}$  and  $\pm 3.5 \cdot 10^{-7}$ . The asterisk marks the epicenter of the Zhupanovsky earthquake. A triangle is a location of borehole G-1. PETS, RADZ, MYAK are the GPS sites in the Petropavlovsk geodynamical testing area. A dashed-dotted line is a nodal plane,  $stk=320^\circ$  [Chebrov et al., 2016].

на дневной поверхности, построенные относительно выбранной нодалной плоскости. Полученные оценки показывают, что накануне момента землетрясения район ПГП находился в зоне относительного сжатия с деформациями от  $-3.5 \cdot 10^{-7}$  до  $-2 \cdot 10^{-7}$ . Сравнение значений деформаций для района ПГП, полученных из теоретических оценок, с данными GPS-измерений (см. рис. 4) показывает, что минорантные оценки значений объемных деформаций в районе ПГП на интервале активной фазы подготовки землетрясения соответствуют амплитудам вариаций ряда дилатации.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты, полученные в ходе сравнительного анализа данных комплексного скважинного мониторинга и данных GPS-измерений на интервале активной фазы подготовки Жупановского землетрясения, свидетельствуют о высокой степени их согласованности. На это в первую очередь указывает соответствие характера изменений дилатации на разных стадиях изменений НДС геосреды в районе ПГП данным электромагнитных и геоакустических скважинных измерений. Значимость исходных данных GPS-измерений, полученных на интервале активной фазы подготовки землетрясения, подтверждается их совпадением с оценками ожидаемых величин объемных деформаций на дневной поверхности накануне момента землетрясения, полученных по результатам математического моделирования. Совместный анализ данных скважинных и GPS-измерений позволил уточнить временные границы стадий изменений НДС, а также устранить неоднозначность в интерпретации результатов электромагнитных и геоакустических скважинных измерений на заключительных стадиях подготовки Жупановского землетрясения.

В этой связи целесообразность привлечения данных ГНСС-измерений к анализу результатов скважинного мониторинга НДС геосреды, проводимого в районе ПГП, не вызывает сомнений. Такой шаг способен значительно повысить эффективность сети мониторинга процессов подготовки сильных близких камчатских землетрясений, опасных для района г. Петропавловска-Камчатского. С учетом того, что наиболее вероятным местом следующего сильнейшего ( $M \geq 7.7$ ) землетрясения для всей Курило-Камчатской дуги является протяженная сейсмическая брешь в районе Авачинского залива [Fedotov, Solomatin, 2019], представляется необходимой в ближайшее время установка новых пунктов ГНСС на мысе Шипунском и в районе Вилючинской сопки (см. рис. 3).

Между тем, оценивая представленные в статье результаты, следует учитывать, что они были получены на интервале активной фазы подготовки Жупановского землетрясения, являющегося самым сильным по величине S сейсмическим событием с момента начала скважинных измерений на территории ПГП. Возможно, что для менее сильных по величине S событий целесообразность привлечения данных ГНСС-измерений

к анализу данных скважинного мониторинга НДС геосреды не будет выглядеть столь очевидной. Проведение исследований в этом направлении планируется авторами в ближайшее время.

## 6. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

## 7. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

## 8. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Bogdanov V.V., Kaisin A.V., Pavlov A.V., Polyukhova A.L., Meister C.V., 2017. Anomalous Behavior of Ionospheric Parameters above Kamchatka Peninsula before and during Seismic Activity. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 98, 154–160. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2016.04.002>.

Bogdanov V.V., Pavlov A.V., 2018. Dynamics of Ionospheric Parameters before Earthquakes on 28.02.2013 – 01.03.2013 and 19.05.2013 – 24.05.2013. *Bulletin of Kamchatka Regional Association "Educational-Scientific Center". Physical and Mathematical Sciences* 2 (22), 85–99 (in Russian) [Богданов В.В., Павлов А.В. Динамика поведения ионосферных параметров накануне землетрясений в периоды 28.02–01.03.2013 г. и 19.05–24.05.2013 г. // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. 2018. № 2 (22). С. 85–99]. <https://doi.org/10.18454/2079-6641-2018-22-2-85-99>.

Bogomolov L.M., Sycheva N.A., 2022. Earthquake Predictions in XXI Century: Prehistory and Concepts, Precursors and Problems. *Geosystems of Transition Zones* 6 (3), 145–182 (in Russian) [Богомолов Л.М., Сычева Н.А. Прогноз землетрясений в XXI веке: предыстория и концепции, предвестники и проблемы // Геосистемы переходных зон. 2022. Т. 6. № 3. С. 145–182]. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2022.6.3.145-164.164-182>.

Chebrov V.N., Kugaenko Yu.A., Abubakirov I.R., Droznina S.Ja., Ivanova E.I., Matveenko E.A., Mityushkina S.V., Ototyuk D.A. et al., 2016. The January 30th, 2016 Earthquake with  $K_s=15.7$ ,  $M_w=7.2$ ,  $I=6$  in the Zhupanovsky Region (Kamchatka). *Bulletin of Kamchatka Regional Association "Educational-Scientific Center". Earth Sciences* 29 (1), 5–16 (in Russian) [Чебров В.Н., Кугаенко Ю.А., Абубакиров И.Р., Дрознина С.Я., Иванова Е.И., Матвеенко Е.А., Митюшкина С.В., Ототюк Д.А. и др. Жупановское землетрясение 30.01.2016 г. с  $K_s=15.7$ ,  $M_w=7.2$ ,  $I=6$  (Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. № 1. Вып. 29. С. 5–16].

Dobrovolsky I.P., 2009. The Mathematical Theory of the Preparation and Prediction of Tectonic Earthquake. Fizmatlit, Moscow, 240 p. (in Russian) [Добровольский И.П. Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. М.: Физматлит, 2009. 240 с.].

Eshelby J.D., 1957. 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 241 (1226), 376–396. <https://doi.org/10.1098/rspa.1957.0133>.

Fedotov S.A., Solomatin A.V., 2019. Long-Term Earthquake Prediction (LTEP) for the Kuril–Kamchatka Island Arc, June 2019 to May 2024; Properties of Preceding Seismicity from January 2017 to May 2019. The Development and Practical Application of the LTEP Method. Journal of Volcanology and Seismology 13, 349–362. <https://doi.org/10.1134/S0742046319060022>.

Firstov P.P., Makarov E.O., 2018. Dynamics of Subsurface Radon in Kamchatka and Strong Earthquakes. Kamchatka State University, Petropavlovsk-Kamchatsky, 148 p. (in Russian) [Фирстов П.П., Макаров Е.О. Динамика подпочвенного радона на Камчатке и сильные землетрясения. Петропавловск-Камчатский: КамГУ, 2018. 148 с.].

Gavrilov V.A., 2014. Method for Continuous Monitoring of Electrical Rock Resistivity. Seismic Instruments 50, 196–205. <https://doi.org/10.3103/S0747923914030062>.

Gavrilov V.A., 2017. Impact of Alternating Electromagnetic Fields on Geoacoustic Processes. PhD Thesis (Candidate of Physical and Mathematical Sciences). Moscow, 385 p. (in Russian) [Гаврилов В.А. Воздействие переменных электромагнитных полей на геоакустические процессы: эмпирические закономерности и физические механизмы: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2017. 385 с.].

Gavrilov V., Bogomolov L., Morozova Yu., Storcheus A., 2008. Variations in Geoacoustic Emissions in a Deep Borehole and Its Correlation with Seismicity. Annals of Geophysics 51 (5–6), 737–753. <http://doi.org/10.4401/ag-3013>.

Gavrilov V.A., Buss Yu.Yu., 2015. High-Frequency (500–1000 Hz) Geoacoustic Emission in the Temporal Vicinities of Large Seismic Events from the Data of Borehole Measurements in the Petropavlovsk-Kamchatsky Geodynamical Testing Area. In: The Problems of Integrated Geophysical Monitoring of the Russian Far East. Proceedings of Fifth Scientific and Technical Conference (September 27 – October 3, 2015). FRS GS RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, p. 288–290 (in Russian) [Гаврилов В.А., Бусс Ю.Ю. Высококачественная (500–1000 Гц) геоакустическая эмиссия во временных окрестностях сильных сейсмических событий по данным скважинных измерений на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: Труды Пятой научно-технической конференции (27 сентября – 3 октября 2015 г.). Петропавловск-Камчатский: ФИЦ ЕГС РАН, 2015. С. 288–290].

Gavrilov V.A., Deshcherevskii A.V., Vlasov Y.A., Buss Yu.Yu., Morozova Yu.V., Poltavtseva E.V., Fedoristov O.V., Denisenko V.P., 2022. Network of Multidisciplinary Borehole Measurements at the Petropavlovsk-Kamchatsky Geodynamic

Testing Area. Seismic Instruments 58, 121–138. <https://doi.org/10.3103/S0747923922020050>.

Gavrilov V.A., Lander A.V., Morozova Yu.V., 2019a. Comparison of Borehole Geoacoustic and Electromagnetic Data with Data of Earthquake Focal Mechanisms. Doklady Earth Sciences 484, 217–221. <https://doi.org/10.1134/S1028334X19020193>.

Gavrilov V.A., Morozova Yu.V., Deshcherevskiy A.V., Buss Yu.Yu., Panteleev I.A., 2019b. Reflection of the Process of Preparation of a Strong Nearby Event of Zhupanovsk in the Data of Integrated Borehole Measurements in the Petropavlovsk-Kamchatsky Geodynamical Testing Area. In: Trigger Effects in Geosystems. Abstracts of the Vth International Conference (June 4–7, 2019, Moscow). Institute of Geosphere Dynamics, Moscow, p. 38–44 (in Russian) [Гаврилов В.А., Морозова Ю.В., Дещеревский А.В., Бусс Ю.Ю., Пантелеев И.А. Отражение процесса подготовки сильного близкого Жупановского события в данных комплексных скважинных измерений на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне // Триггерные эффекты в геосистемах: Тезисы докладов V Международной конференции (4–7 июня 2019, Москва). М.: ИДГ РАН, 2019. С. 38–44].

Gavrilov V.A., Morozova Yu.V., Storcheus A.V., 2006. Variations in the Level of Geoacoustic Emission in Deepwell G-1, Kamchatka and Their Relation to Seismicity. Volcanology and Seismology 1, 52–67 (in Russian) [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].

Gavrilov V.A., Naumov A.V., 2017. Modulation of Geoacoustic Emission Intensity by Time-Varying Electric Field. Russian Journal of Earth Sciences 17, ES1003. <https://doi.org/10.2205/2017ES000591>.

Gavrilov V.A., Panteleev I.A., Deshcherevskii A.V., Lander A.V., Morozova Yu.V., Buss Yu.Yu., Vlasov Yu.A., 2020. Stress-Strain State Monitoring of the Geological Medium Based on the Multi-Instrumental Measurements in Boreholes: Experience of Research at the Petropavlovsk-Kamchatskii Geodynamic Testing Site (Kamchatka, Russia). Pure and Applied Geophysics 177, 397–419. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02311-3>.

Gerasimenko M.D., 2017. Identification of Crustal Movements and Deformations from the Geodetic Measurements. A Study Guide. Vladivostok, 36 p. (in Russian) [Герасименко М.Д. Определение движений и деформаций земной коры по геодезическим измерениям: Учебное пособие. Владивосток, 2017. 36 с.].

Gordeev E.I., Pavlov V.M., 2009. Subduction of the Pacific Plate under Kamchatka: Seismic Velocity of Underthrust. Izvestiya, Physics of the Solid Earth 45, 326–337. <https://doi.org/10.1134/S1069351309040053>.

Herring T.A., King R.W., Floyd M., McClusky S.C., 2018. Introduction to GAMIT/GLOBK. Release 10.7. Technical Report. Massachusetts Institute of Technology, 54 p. Available from: [http://geoweb.mit.edu/gg/Intro\\_GG.pdf](http://geoweb.mit.edu/gg/Intro_GG.pdf) (Last Accessed March 1, 2023).

Kopylova G.N., Boldina S.V., 2019. Hydrogeoseismological Research in Kamchatka: 1977–2017. *Journal of Volcanology and Seismology* 13, 71–84. <https://doi.org/10.1134/S0742046319020040>.

Koronovsky N.V., Zakharov V.S., Naimark A.A., 2019. The Short-Term Forecast of Earthquakes: Reality, Scientific Perspective or the Project-Phantom? *Bulletin of Moscow University. Series 4. Geology* 3, 3–12 (in Russian) [Короновский Н.В., Захаров В.С., Наймарк А.А. Краткосрочный прогноз землетрясений: реальность, научная перспектива или проект-фантом? // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2019. № 3. С. 3–12].

Koronovsky N.V., Zakharov V.S., Naimark A.A., 2021. Unpredictability of Strong Earthquakes: New Understanding of the Problem and Its Solution. *Bulletin of Moscow University. Series 4. Geology* 3, 17–25 (in Russian) [Короновский Н.В., Захаров В.С., Наймарк А.А. Непредсказуемость сильных землетрясений: новое понимание проблемы и ее решение // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2021. № 3. С. 17–25].

Levin V.E., Bakhtiarov V.F., Titkov N.N., Serovetnikov S.S., Magus'kin M.A., Lander A.V., 2014. Contemporary Crustal Movements (CCMS) In Kamchatka. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 50, 732–751. <https://doi.org/10.1134/S1069351314060044>.

Lyubushin A.A., 2007. Analysis of the Data on Geophysical and Ecological Monitoring Systems. *Nauka, Moscow*, 228 p. (in Russian) [Любушин А.А. Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. М.: Наука, 2007. 228 с.].

Lyubushin A.A., 2008. Microseismic Noise in the Low Frequency Range (Periods of 1–300 min): Properties and Possible Prognostic Features. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 44, 275–290. <https://doi.org/10.1134/s11486-008-4002-6>.

Lyubushin A.A., 2009. Synchronization Trends and Rhythms of Multifractal Parameters of the Field of Low-Frequency Microseisms. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 45, 381–394. <https://doi.org/10.1134/S1069351309050024>.

Lyubushin A.A., 2011. Japan Seismic Catastrophe 11 of March 2011: Long-Term Prediction by Microseismic Noise

Properties. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics* 10 (1), 9–35 (in Russian) [Любушин А.А. Сейсмическая катастрофа в Японии 11 марта 2011 г.: долгосрочный прогноз по низкочастотным микросейсам // Геофизические процессы и биосфера. 2011. Т. 10. № 1. С. 9–35].

Lyubushin A.A., 2013. Mapping the Properties of Low-Frequency Microseisms for Seismic Hazard Assessment. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 49, 9–18. <https://doi.org/10.1134/S1069351313010084>.

Panteleev I.A., Poltavceva E.V., Mubassarova V.A., Gavrilov V.A., 2017. 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* 4, 138–153 (in Russian) [Пантелеев И.А., Полтавцева Е.В., Мубассарова В.А., Гаврилов В.А. Возмущение напряженно-деформированного состояния упругого полупространства шаровой неоднородностью упругих свойств при сдвиге в горизонтальной плоскости с учетом гравитационных сил // Вестник ПНИПУ. Механика. 2017. № 4. С. 138–153]. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2017.4.10>.

Rebetsky Y.L., Lermontova A.S., 2018. On the Long-Range Influence of Earthquake Rupture Zones. *Journal of Volcanology and Seismology* 12 (5), 341–352. <https://doi.org/10.1134/S0742046318050068>.

Riznichenko Yu.V., 1976. Focal Parameters of the Crustal Earthquake and a Seismic Moment. In: *Studies in Earthquake Source Physics*. *Nauka, Moscow*, p. 9–18 (in Russian) [Ризниченко Ю.В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Исследования по физике очага землетрясения. М.: Наука, 1976. С. 9–18].

Ryabinin G.V., Khatkevich Yu.M., 2009. Hydrogeochemical Factors Preceded Large Earthquakes in Kamchatka: Identification Algorithm and Morphological Analysis. *Bulletin of Kamchatka Regional Association "Educational-Scientific Center"*. *Earth Sciences* 13 (1), 107–121 (in Russian) [Рябинин Г.В., Хаткевич Ю.М. Гидрогеохимические эффекты, предшествующие сильным землетрясениям Камчатки. Алгоритм идентификации и морфологический анализ // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2009. Вып. 13. № 1. С. 107–121].