

Первые результаты мониторинга пространственно-временных изменений полного электронного содержания ионосферы, связанных с подготовкой сильных камчатских землетрясений

Полтавцева Е.В.¹, Гаврилов В.А.¹, Сагарьяров И.А.¹, Бусс Ю.Ю.¹, Титков Н.Н.²

First results of monitoring of spatiotemporal changes in the ionosphere's total electron content prior to strong Kamchatka earthquakes

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

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

² *Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский*

Представлены результаты совместного анализа данных скважинного мониторинга в районе Петропавловского геодинамического полигона (ППП) и рядов вариаций полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы во временных окрестностях сильных камчатских землетрясений. Сопоставлялось пространственное распределение аномалий ПЭС на интервалах активной фазы подготовки землетрясений с локализацией зон растяжения и сжатия геосреды в районе ППП.

В настоящее время в мировой практике в качестве одного из источников информации о процессах подготовки сильных землетрясений достаточно широко используются результаты измерений полного электронного содержания ионосферы (ПЭС), получаемые по данным Глобальных Навигационных Спутниковых Систем (ГНСС) [1]. Возможность непрерывного мониторинга изменений ПЭС при использовании сетей ГНСС позволяет, в том числе, практически в режиме реального времени создавать двумерные карты аномалий ПЭС для выбранной пространственной локации. По этой причине создание подобной системы мониторинга для района ППП может значительно повысить надежность среднесрочного и краткосрочно прогнозирования сильных камчатских землетрясений, опасных для г. Петропавловск-Камчатский. Вместе с тем, возможный физический механизм формирования аномальных возмущений ПЭС, стабильно регистрируемых перед сильными землетрясениями, а также сама возможность использования данных мониторинга ПЭС для прогнозирования землетрясения, в настоящее время являются предметами дискуссий [5].

Основной задачей первого этапа исследований, проводившихся авторами в рамках указанного научного направления, являлась оценка целесообразности привлечения данных непрерывного мониторинга изменений ПЭС ионосферы для повышения эффективности существующей системы мониторинга процессов подготовки сильных камчатских землетрясений. Для этого планами работ предусматривалось построение двумерных карт для района ППП с аномалиями ПЭС, зарегистрированными на интервалах активной фазы подготовки Жупановского ($M_W=7.2$; 30.01.2016 г.) и Вилючинского ($M_W=6.5$; 03.04.2023 г.) землетрясений – самых сильных за последние 10 лет камчатских землетрясений по величине отношения длины очага землетрясения к гипоцентральному расстоянию (37 % и 34 %, соответственно). Кроме этого, по результатам обработки исходных данных изменений УЭС геосреды для тех же временных интервалов выделялись зоны сжатия и растяжения геосреды в районе ППП. Критерием целесообразности использования данных ПЭС ионосферы для задач мониторинга процессов подготовки камчатских землетрясений являлась степень коррелированности пространственно-временных изменений ПЭС ионосферы над районом ППП с изменениями УЭС геосреды для района ППП на интервалах активной фазы подготовки Жупановского и Вилючинского землетрясений.

Для получения значений ПЭС ионосферы, необходимых для решения указанной задачи, использовались данные RINEX-файлов Камчатской сети ГНСС наблюдений, обработанные по методике, описанной в [1]. С помощью разработанного авторами программного обеспечения полученные значения ПЭС затем обрабатывались для

формирования временных рядов ПЭС подионосферных точек территории ПГП. Как показано ниже, такой подход, базирующийся на совместном анализе временных рядов данных разнородных видов измерений (в данном случае результатов ГНСС наблюдений и данных изменений УЭС геосреды), позволяет, как правило, получать более наглядные и надежные результаты в сравнении с другими подходами при анализе таких данных.

Данные временных рядов УЭС геосреды в районе ПГП, использованные для проведения исследований, являются результатами непрерывного электромагнитного мониторинга изменений напряженно-деформированного состояния (НДС) геосреды, проводимого с 2005 г. в целях средне- и краткосрочного прогнозирования сильных камчатских землетрясений [2, 3]. Электромагнитный мониторинг проводится с использованием подземных электрических антенн, основным конструктивным элементом которых является металлическая обсадная колонна скважины. Физическая основа метода – зависимость УЭС горных пород от степени их влажности.

На рис. 1 представлены двумерные интерполированные карты возмущений ПЭС ионосферы над районом ПГП, построенные для выбранных временных интервалов на заключительной стадии подготовки Жупановского землетрясения.

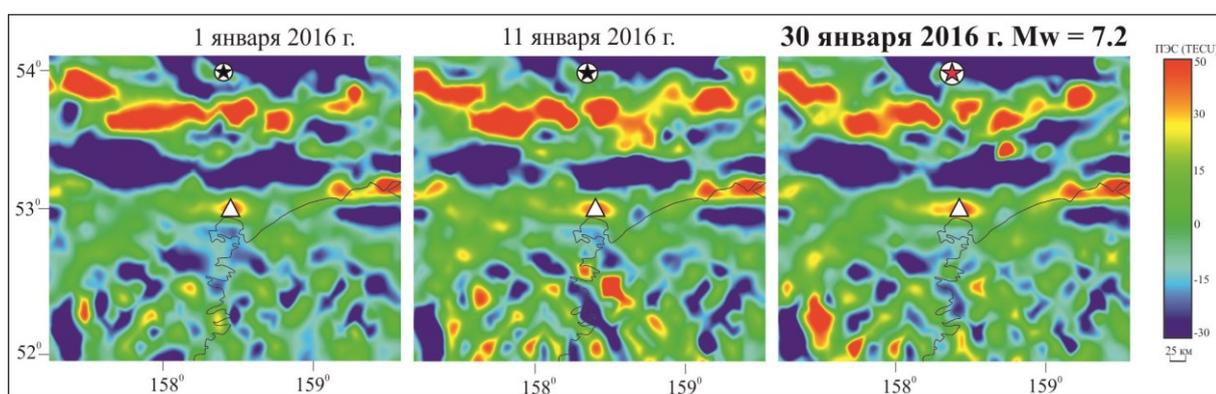


Рис. 1. Двумерные интерполированные карты возмущений ПЭС ионосферы, построенные за выбранные сутки в период подготовки и реализации Жупановского землетрясения. Треугольником отмечено расположение скважины Г-1, звездочкой – расположение эпицентра.

Можно видеть, что уже за 30 суток до момента землетрясения в районе его будущего очага появились области с повышенными значениями ПЭС ионосферы. Фактически это указывает на перспективность использования данных непрерывного мониторинга ПЭС ионосферы для задач среднесрочного и краткосрочного прогнозирования сильных камчатских землетрясений.

Отметим, что существование таких долговременных аномалий ПЭС практически невозможно объяснить с позиций физических механизмов, в которых основной акцент делается на изменениях объемной активности радона перед землетрясениями.

На рис. 2 приводится карта возмущений ПЭС ионосферы в январе 2016 г. перед Жупановским землетрясением в сопоставлении с распределением зон сжатия и растяжения в районе ПГП. Для построения карты на основе данных о смещениях измерительных пунктов Камчатской сети ГНСС наблюдений, после необходимой предобработки (сглаживания, устранения субдукционного тренда и сезонных вариаций) рассчитывалась дилатация для каждого треугольника сети как сумма главной диагонали тензора плоской деформации, и по результатам расчетов формировался временной ряд среднесуточных значений плоской дилатации. При этом анализировались относительные процентные изменения в каждом ряде дилатации за 90-120 суток до Жупановского землетрясения. На рис. 2 синей штриховкой отмечены зоны, для которых в соответствующих рядах наблюдалось уменьшение дилатации на 30 % и более процентов, красной штриховкой – зоны с возрастанием дилатации на 50 %

и более процентов. В частности, зона ПГП и скв. Г-1 находятся в обширной зоне сжатия, что совпадает с количественными оценками по консолидационной модели И.П. Добровольского, приведенными в работе [4].

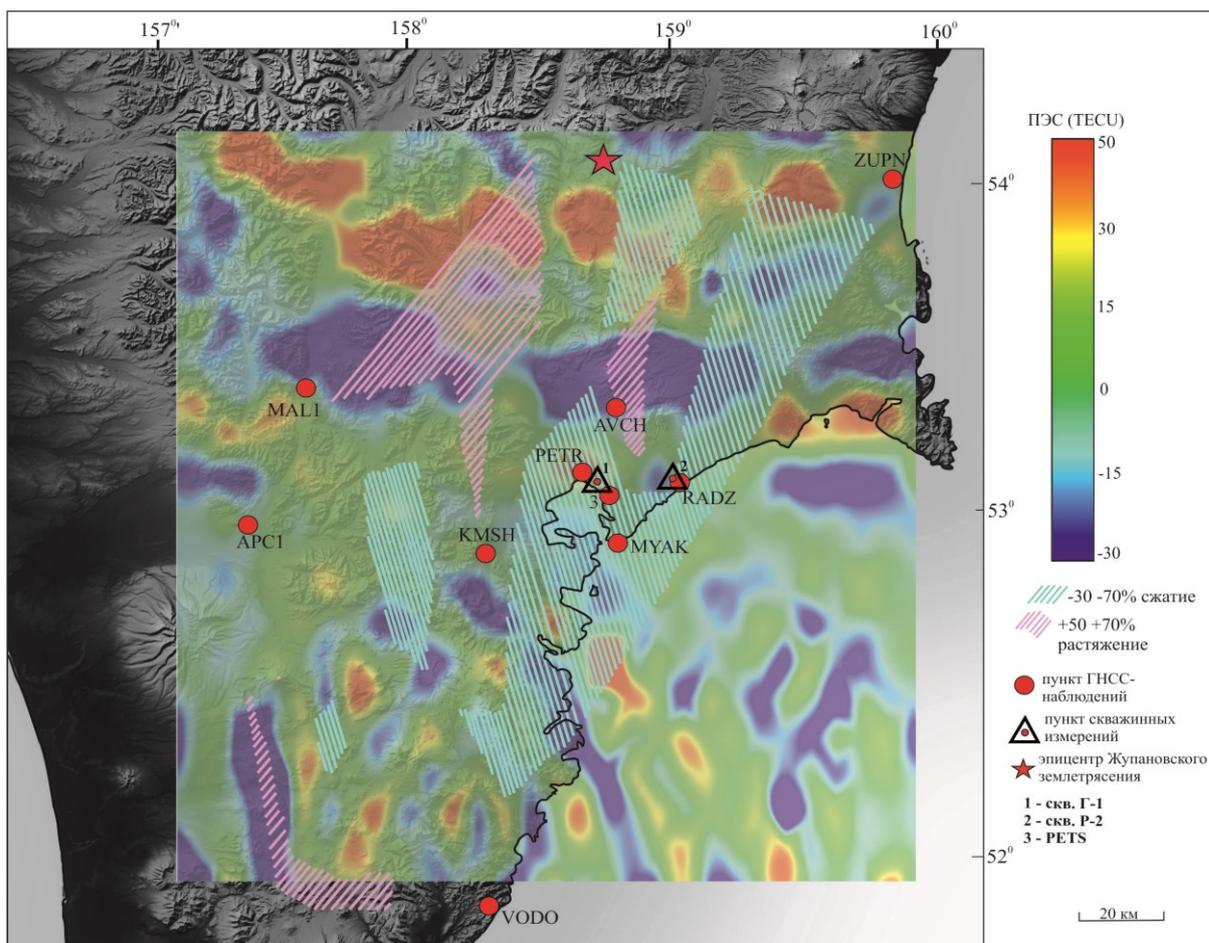


Рис. 2. Карта возмущений ПЭС ионосферы в январе 2016 г. перед Жупановским землетрясением в сопоставлении с распределением зон растяжения и сжатия. Синей штриховкой отмечены зоны, для которых в соответствующих рядах наблюдалось уменьшение дилатации на 30 % и более процентов, красной штриховкой – зоны с возрастанием дилатации на 50 % и более процентов.

Из приводимых на рис. 2 данных можно сделать вывод, что долговременные (более 90 суток) аномалии ПЭС ионосферы отражают изменения УЭС геосреды, связанные с процессами на заключительной стадии подготовки сильного Жупановского землетрясения.

На рис. 3 приводится аналогичная карта, полученная по данным накануне Вилючинского землетрясения. Можно видеть, что в этом случае основная часть как положительных, так и отрицательных ионосферных аномалий сосредоточена над Авачинским заливом. При этом зона растяжения качественно ложится на области положительных аномалий ПЭС, зона сжатия – на области отрицательных.

Отметим, что большее число пунктов ГНСС наблюдений могло бы существенно уточнить картину распределения деформационных зон, приводимых на рис. 2 и рис. 3.

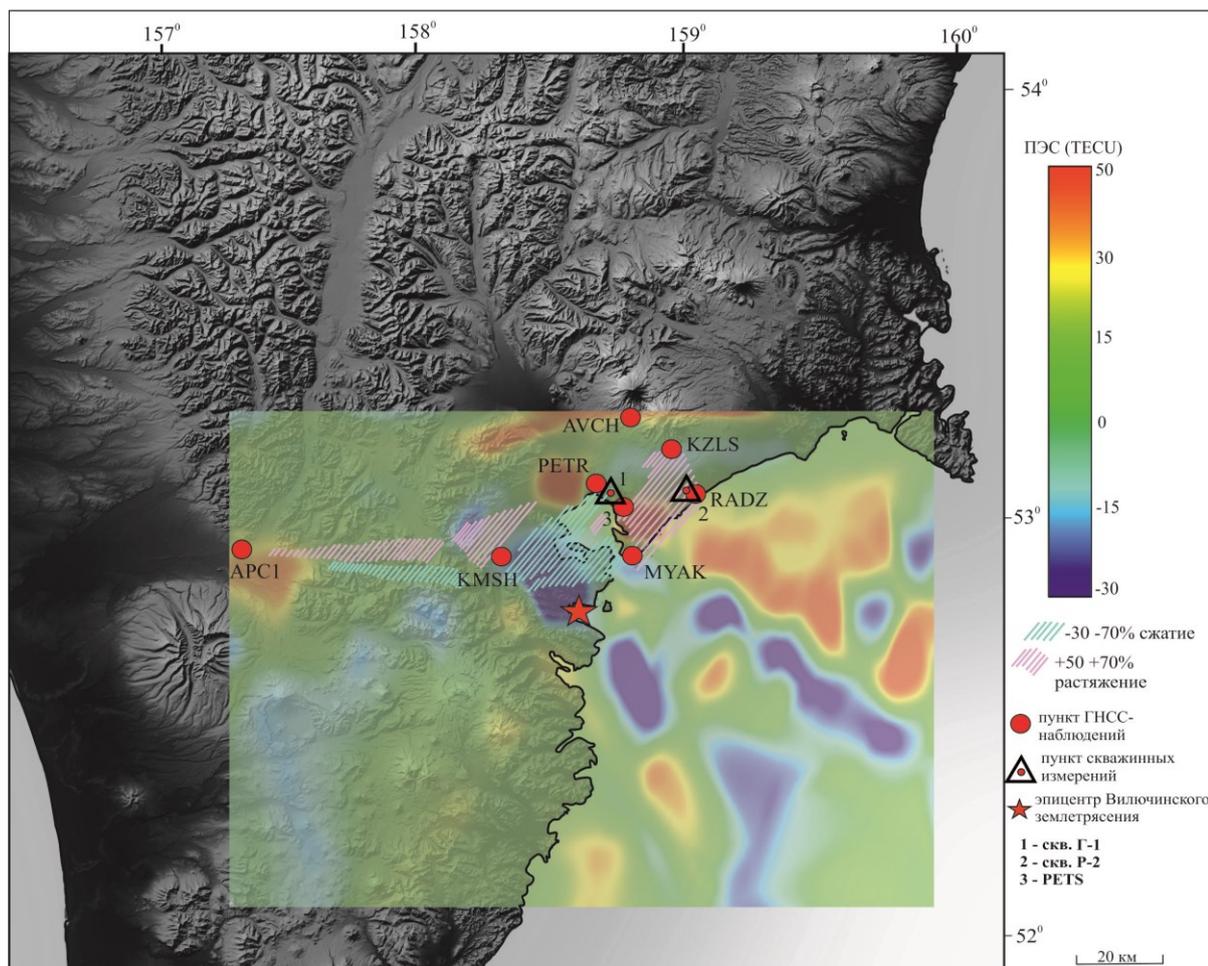


Рис. 3. Карта возмущений ПЭС ионосферы в январе 2016 г. перед Жупановским землетрясением в сопоставлении с распределением зон растяжения и сжатия. Синей штриховкой отмечены зоны, для которых в соответствующих рядах наблюдалось уменьшение дилатации на 30 % и более процентов, красной штриховкой – зоны с возрастанием дилатации на 50 % и более процентов.

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

Список литературы

1. Афраймович Э.Л., Первалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.
2. 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.
3. 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>
4. 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. <https://doi.org/10.5800/GT-2023-14-6-0732>
5. Pulinets S.A., Boyarchuk K.A. *Ionospheric Precursors of Earthquakes*. Berlin: Springer, 2004. 315 p.