

Пространственно-временные изменения полного электронного содержания ионосферы перед Шипунским землетрясением (17.08.2024, $M_w=7.0$). Первые результаты

Полтавцева Е.В.^{1,3}, Сагарьяров И.А.^{1,3}, Гаврилов В.А.^{1,3}, Бусс Ю.Ю.¹, Морозова Ю.В.¹, Титков Н.Н.²

Spatiotemporal changes in the total electronic content of the ionosphere recorded before the Shipunskoye earthquake (17.08.2024, $M_w=7.0$). The first results

Poltavtseva E.V., Sagaryarov I.A., Gavrilov V.A., Buss Yu.Yu., Morozova Yu.V., 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*

³ *Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга*

В работе представлены результаты мониторинга полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы, полученные по данным нового пункта SPNS Камчатской ГНСС-сети. Указанный пункт был установлен на м. Шипунском в июле 2024 г. примерно за месяц накануне сильного Шипунского землетрясения (17.08.2024 г., $M_w=7.0$).

На территории Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона (ППП) с 2005 г. проводится непрерывный комплексный геофизический мониторинг процессов подготовки сильных камчатских землетрясений [6]. В том числе, с недавнего времени проводится мониторинг изменений полного электронного содержания (ПЭС, в англоязычной литературе ТЕС (Total Electron Content)) ионосферы с использованием данных, получаемых на пунктах локальной сети Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС-сети). При этом был получен ряд результатов, указывающих на связь изменений ПЭС ионосферы с изменениями удельного электрического сопротивления (УЭС) геосреды, а также на появление областей с положительными возмущениями ПЭС в околоэпицентральной зоне будущего сильного близкого землетрясения. В частности, это показано на примере результатов, полученных при подготовке Жупановского землетрясения (30.01.2016 г., $M_w=7.2$) [2-4].

После первых успешных результатов, полученных в ходе совместного анализа данных об изменениях ПЭС ионосферы и данных наземного комплексного геофизического мониторинга [2-4], летом 2024 г. были организованы совместные работы ИВиС ДВО РАН и Камчатского филиала Геофизической службы РАН (КФ ГС РАН) по созданию новой станции Камчатской сети ГНСС-наблюдений на мысе Шипунский (станция SPNS). Выбор в качестве первоочередной именно этой задачи был обусловлен тем, что наиболее вероятным местом следующего сильнейшего ($M \geq 7.7$) землетрясения в Курило-Камчатской дуге, согласно [5], является протяженная сейсмическая брешь в районе Авачинского залива.

Станция SPNS на мысе Шипунский была введена в непрерывную работу 7 июля 2024 г. На станции установлен двухчастотный ГНСС-приемник 4GNSS OC-113, позволяющий вести регистрацию сигналов навигационных систем GPS, GLONASS, Galileo, Beidou. Регистрация сигналов ведется с периодом 30 с.

Методика получения значений наклонного ПЭС ионосферы на луче «приемник-спутник» подробно описана в [1] и реализована в программном обеспечении `tec_suite` (<https://github.com/gnss-lab/tec-suite/issues>), где в качестве входных данных используются RINEX-файлы приемника ГНСС-сети. Дальнейшее преобразование значений наклонного ПЭС в вертикальное (VTEC), а также расчет широты и долготы подионосферных точек, к которым привязываются полученные значения, проводятся с использованием собственных программных средств на языках Python 3.11 и Golang. Созданное программное обеспечение позволяет также визуализировать пространственные изменения ПЭС над выбранной территорией в виде двумерной

интерполированной карты подионосферных траекторий, в качестве метода интерполяции был выбран метод кубических сплайнов. Для получения такой интерполированной карты небольшой области (около 2° широты на 2° долготы) достаточно одной станции ГНСС-сети, если она расположена вблизи центральной части указанной территории.

Шипунское землетрясение, вызвавшее в г. Петропавловск-Камчатский сотрясения силой до 6 баллов по шкале ШСИ-17, произошло спустя немногим более месяца после запуска в работу станции SPNS. При этом эпицентр землетрясения оказался расположенным на расстоянии всего лишь около 23 км от станции. Значение параметра S (отношение длины очага землетрясения к гипоцентральному расстоянию) для этого события составило 58 %, что является самым большим значением для камчатских землетрясений с 2000 г. В этой связи представилась уникальная возможность проследить эволюцию пространственных и временных изменений ПЭС ионосферы непосредственно над зоной будущего эпицентра сильного землетрясения по данным одной станции. На рис. 1 приведены интерполированные карты для темного времени суток за несколько выбранных дней до события. Перед нанесением на карту все значения абсолютного вертикального ПЭС проходили обязательную предобработку – чистку грубых выбросов, помех, а также сглаживание средне медианным фильтром в скользящем окне. Все указанные сутки отличались спокойной геомагнитной обстановкой, значение Dst-индекса не падало ниже -10. За сутки до события в околоэпицентральной зоне будущего землетрясения проявились области с повышенными значениями ПЭС.

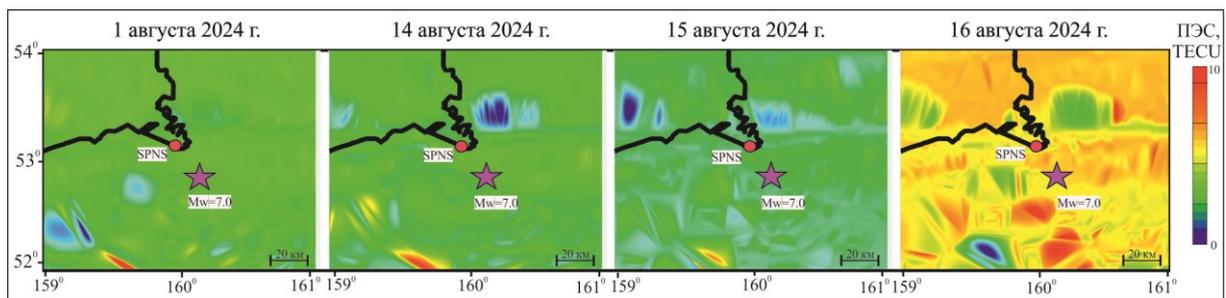


Рис. 1. Двумерные интерполированные карты возмущений ПЭС ионосферы, построенные за темное время суток (21:00-06:00 местного времени) в указанные даты на интервале подготовки Шипунского землетрясения по данным пункта SPNS (красный кружок). Звездочкой отмечено расположение эпицентра.

Для построения временных вариаций ПЭС использовался метод расчета псевдодальностей по фазе [1]. Вследствие возникающей фазовой неоднозначности полученные значения ПЭС не являются абсолютными. Вместе с тем, полученный временной ряд оказался гораздо менее зашумленным в сравнении с результатами, полученными при расчетах по коду. На рис. 2 приведен исходный временной ряд вертикального ПЭС для станции SPNS до и после коррекции от влияния солнечного излучения. Изменения индекса солнечной активности F10.7 имеют 27-суточную периодичность, связанную с периодом оборота Солнца вокруг своей оси. Для устранения влияния солнечной активности из исходного ряда была выделена 27-суточная компонента методами линейной фильтрации, на которую затем была произведена компенсация исходного ряда с использованием метода линейной регрессии (рис. 2г).

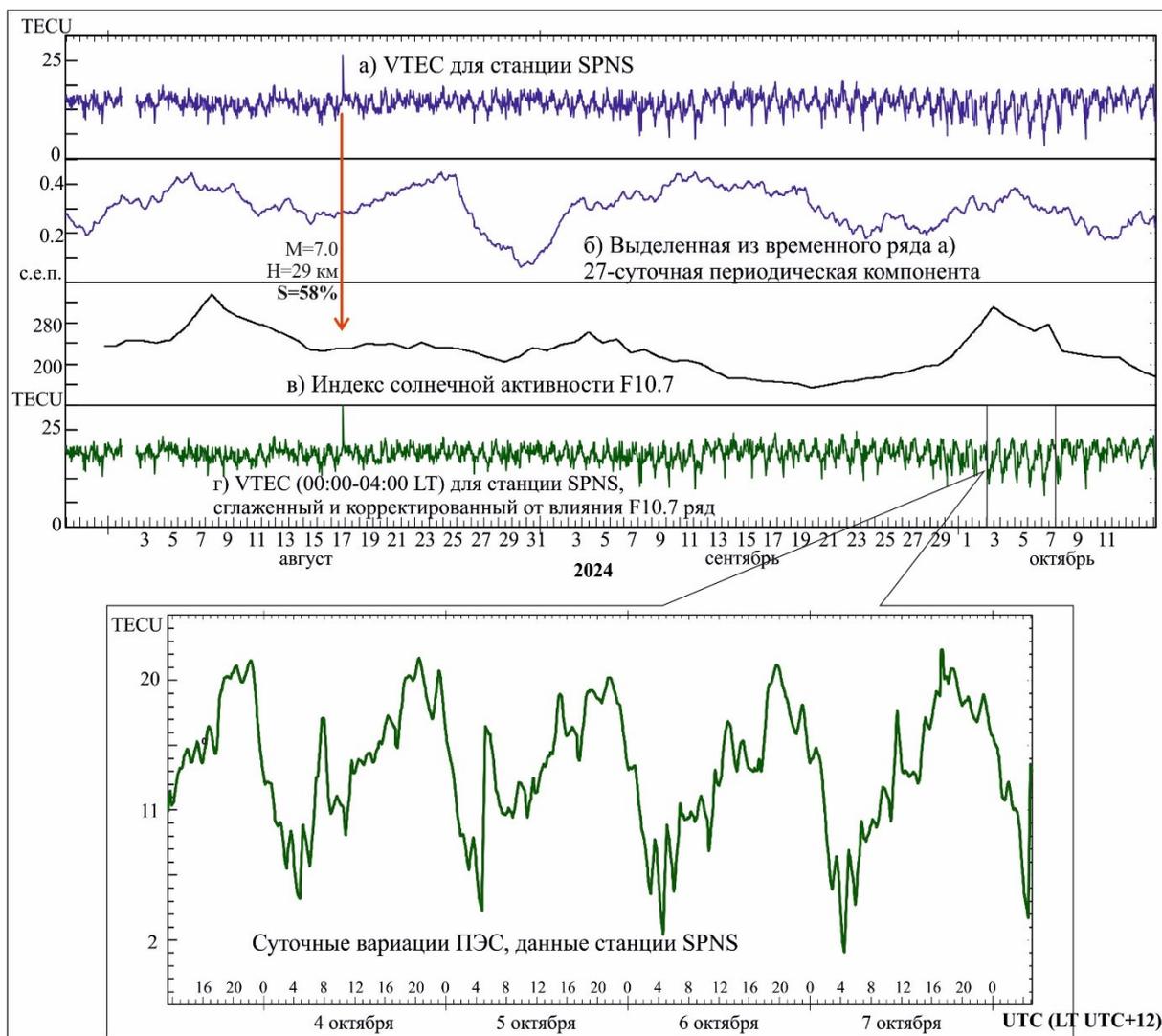


Рис. 2. Изменения вертикального ПЭС (VTEC) ионосферы по данным станции SPNS в период подготовки и реализации Шипунского землетрясения до и после коррекции от влияния индекса солнечной активности F10.7. На врезке показаны суточные вариации изменений ПЭС.

На врезке рис. 2 участок ряда изменений ПЭС представлен в более крупном масштабе. Обращают на себя внимание четкие суточные вариации. Можно видеть, что максимальные значения ПЭС фиксируются в утренние часы после восхода солнца (местное время UTC+12). Можно сделать вывод о достаточно высоком качестве данных изменений ПЭС ионосферы, получаемых по результатам измерений на станции SPNS.

Из приводимых на рис. 1 и рис. 2 результатов можно сделать вывод, что данных даже одной измерительной станции ГНСС-сети может быть достаточно для своевременного детектирования пространственных и временных возмущений ПЭС ионосферы, если расположение ГНСС-приемника выбрано таким образом, что подионосферные траектории равномерно заполняют пространственную область с наиболее вероятным местом эпицентра будущего сильного землетрясения. В этой связи запланированы работы по организации нового пункта ГНСС-наблюдений в районе Вилючинского перевала.

Список литературы

1. Афраймович Э.Л., Первалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАН, 2006. 480 с.
2. Полтавцева Е.В., Гаврилов В.А., Сагарьяров И.А. Мониторинг пространственно-временных изменений полного электронного содержания ионосферы как часть комплексного

- геофизического мониторинга процессов подготовки сильных камчатских землетрясений. Геодинамические процессы и природные катастрофы: тезисы докладов V Всероссийской научной конференции с международным участием, г. Южно-Сахалинск, 27-31 мая 2024 г. / отв. ред. Л.М. Богомолов. Южно-Сахалинск: Ин-т морской геологии и геофизики ДВО РАН, 2024. С. 70. <https://doi.org/10.30730/978-5-6044483-5-9.2024-8>
3. *Полтавцева Е.В., Гаврилов В.А., Сагарьяров И.А.* Отражение процессов подготовки сильных камчатских землетрясений в формировании возмущений полного электронного содержания ионосферы // Материалы 22-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН, 11-15 ноября 2024 г. С. 451. <https://doi.org/10.21046/22DZZconf-2024a>
 4. *Полтавцева Е.В., Гаврилов В.А., Сагарьяров И.А. и др.* Первые результаты мониторинга пространственно-временных изменений полного электронного содержания ионосферы, связанных с подготовкой сильных камчатских землетрясений // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXVII ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский, 2024. С. 187-190.
 5. *Федотов С.А., Соломатин А.В.* Долгосрочный сейсмический прогноз (ДССП) для Курило-Камчатской дуги на VI 2019-V 2024 гг.; свойства предшествующей сейсмичности в I 2017-V 2019 гг. Развитие и практическое применение метода ДССП // Вулканология и сейсмология. 2019. № 6. С. 6-22.
 6. *Gavrilov V.A., Dshcherevskii 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>