

Сезонные изменения ионосферной возмущенности по данным ГНСС-наблюдений на территории Петропавловск-Камчатского геодинимического полигона в период подготовки Камчатского мегаземлетрясения (29.07.2025 г., Mw=8.8)

Малышева А.С.^{1,2}, Полтавцева Е.В.^{1,2}, Сагарьяров И.А.^{1,2}

Seasonal changes in ionospheric disturbances inferred from GNSS observations in the Petropavlovsk-Kamchatsky testing site prior to the Kamchatka mega-earthquake (29.07.2025, Mw=8.8)

Malysheva A.S., Poltavtseva E.V., Sagaryarov I.A.

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

² *Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга, г. Петропавловск-Камчатский*

Представлены результаты мониторинга вертикального полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы по данным двух среднеширотных ГНСС-станций за 2021-2025 гг. Проанализирована сезонная динамика высокочастотной и трендовой составляющих временных рядов ПЭС и их связь с гелио- и геомагнитной активностью.

Введение

За последнее время, в процессе анализа данных мониторинга вертикального полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы с использованием станций сетей Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) на территории Петропавловск-Камчатского геодинимического полигона (ПП), был получен ряд результатов, отражающих подготовку сильных Камчатских землетрясений 2024-2025 гг. [1]. В том числе были обнаружены изменения в рядах ПЭС, построенных для локального ночного времени суток, перед сильнейшим землетрясением Шипунское-1 (17.08.2024 г., Mw=7.0) [3], а также перед Камчатским мегаземлетрясением (29.07.2025 г., Mw=8.8). Возникла необходимость проанализировать сезонные (годовые, полугодовые, суточные) вариации в рядах многолетних наблюдений за изменением ПЭС для территории ПП, а также их возможную связь с солнечной и геомагнитной активностью. Это могло бы в значительной степени прояснить физические причины наблюдаемых возмущений ПЭС и снять часть вопросов об их возможном естественном происхождении, не связанном с процессами, протекающими в геосреде перед сильными землетрясениями.

Методы исследования и результаты

В качестве исходных данных были использованы RINEX-файлы ГНСС-станций PETH (Федеральная астрономо-геодезическая сеть, 53.08° с.ш., 158.64° в.д., г. Петропавловск-Камчатский) и YUSK (Роскосмос, 47.03° с.ш., 142.71° в.д., г. Южно-Сахалинск), доступные на серверах Федерального центра навигационных данных (<https://fcnd.ru>). Получение значений наклонного ПЭС ионосферы по кодовым расчетам псевдодальностей, перевод в вертикальное ПЭС с учетом сферичности Земли и формирование временных рядов за весь доступный период наблюдений (для станции PETH это 2021-2025 гг., для станции YUSK – 2022-2025 гг.) проводились с использованием программного обеспечения Ion [4]. Основным аргументом в пользу выбора именно этих станций послужило их расположение: станция PETH находится на территории ПП, на расстоянии ~100-150 км от эпицентральной области Камчатского мегаземлетрясения, станция YUSK расположена на значительном отдалении от зоны Авачинского залива и была выбрана в качестве контрольной. Обе станции относятся к среднеширотной зоне (<60° с.ш.).

На рис. 1 представлены среднегодовые вариации вертикального ПЭС для обеих ГНСС-станций, полученные в программной среде Winabd с использованием фильтра Wseason, позволяющего методом наложения эпох рассчитывать квазипериодические

составляющие временных рядов с фиксированным периодом и медленно меняющимися во времени фазой, амплитудой и/или формой вариации [2]. Поверх исходных рядов толстой линией на рис. 1 и рис. 3 также показаны усредненные вариации в окне 27 суток (периодическая составляющая индекса солнечной активности F10.7, связанная с периодом обращения Солнца вокруг своей оси).

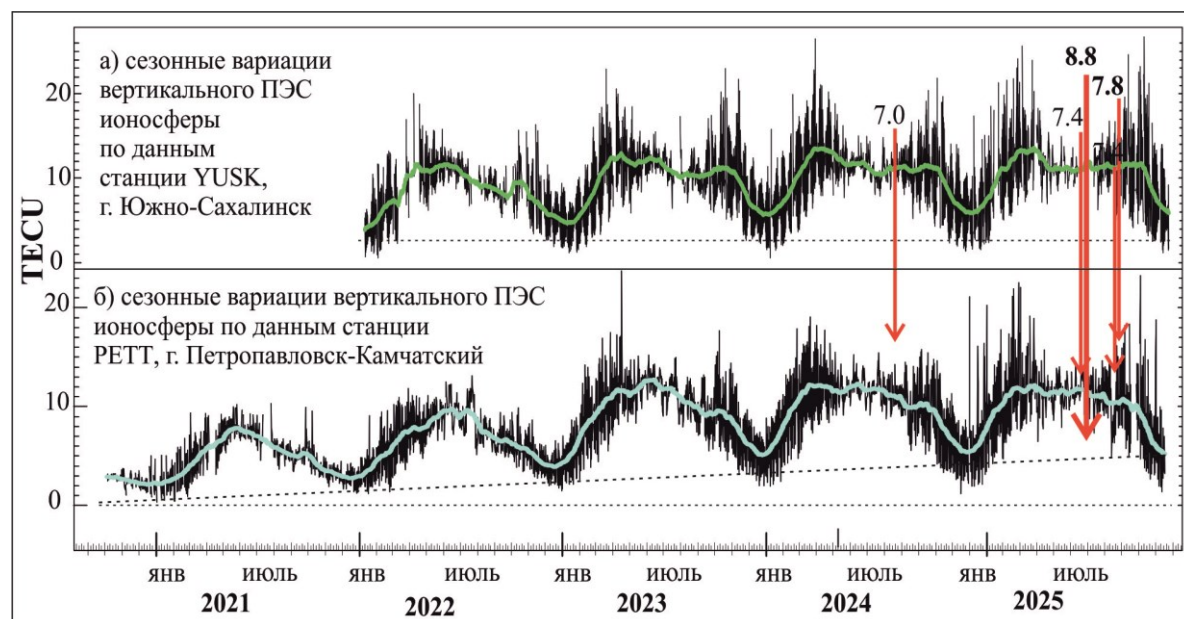


Рис. 1. Среднегодовые вариации по данным ГНСС-станций PETT (а) и YUSK (б), построенные в скользящем окне. Толстыми линиями выделены усредненные среднегодовые вариации в скользящем окне шириной 27 суток.

В течение всего многолетнего периода наблюдений ряды ПЭС характеризуются устойчивым годовым ходом как трендовых вариаций среднего уровня, так и высокочастотных вариаций дисперсии (ионосферной возмущенности). Максимум среднего уровня приходится на летний период, апрель-сентябрь, минимум – на декабрь-февраль. Дисперсия достигает пиковых значений, напротив, в зимнее время, в период с декабря по март, а в летние месяцы амплитуды вариаций ПЭС небольшие. При этом наблюдается рост «зимней» дисперсии, начиная с 2022-2023 гг., по данным обеих станций, однако более выраженный для станции PETT, причины которого требуют уточнения. Указанные периодические изменения ПЭС ионосферы наблюдаются для всех широтных зон и обусловлены естественными изменениями солнечной активности в течение года [5]. Однако для приведенных ГНСС-станций на рис. 1 можно отметить и некоторые особенности изменений ПЭС, в частности, рост минимальных значений среднего уровня в летний период, наблюдаемый для станции PETT и отсутствующий в данных ПЭС для станции YUSK. На рис. 2 приведены суточные вариации ПЭС для обеих станций, построенные методами фильтра Wseason в зимнее и летнее время для каждого года наблюдения.

На рис. 2а видно, что увеличение амплитуды в зимний период характерно для обеих станций; кроме того, наблюдается существенный рост максимальных значений суточных вариаций, достигающий пика в 2024-2025 гг. В работе [5] приводятся аналогичные данные для ГНСС-станций в различных широтных зонах совместно с изменениями солнечной активности. Можно предположить, что такое увеличение амплитуды суточных вариаций от года к году связано с прохождением пика солнечной активности в 25-м цикле.

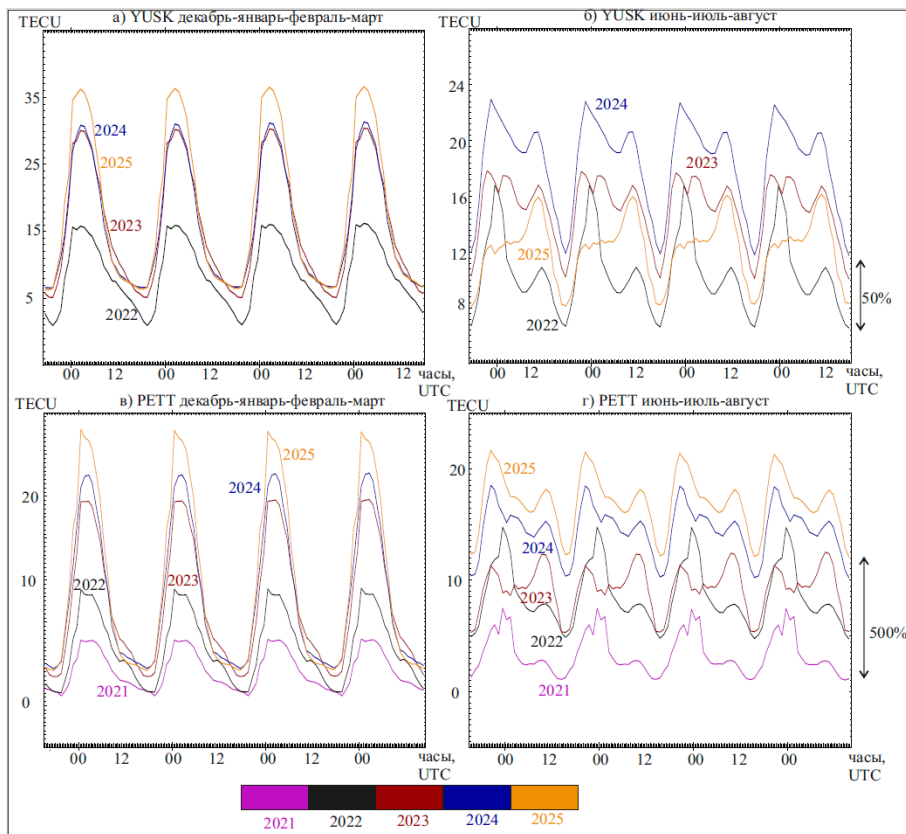


Рис. 2. Среднесуточные вариации по данным станций YUSK (а, б) и PETT (в, г), построенные в зимнее и летнее время для каждого года в течение 2021-2025 гг.

На рис. 3а, б представлены изменения нормированной дисперсии I_n для среднегодовых вариаций вертикального ПЭС по данным обеих станций. Нормированная дисперсия среднегодовых вариаций вычислялась по формуле (1):

$$I_n = \sqrt{(I_v - \bar{I}_v)^2} \quad (1)$$

где I_v – значения вертикального ПЭС, \bar{I}_v – значения вертикального ПЭС, усредненные в окне 27 суток.

На рис. 3в приведены изменения геомагнитного индекса Dst, отражающего интенсивность магнитных бурь и возмущенность кольцевого тока магнитосферы, на рис. 3г – изменения индекса солнечной активности F10.7 (поток радиоизлучения на длине волны 10.7 см, характеризующий уровень ультрафиолетового излучения Солнца и степень ионизации верхней атмосферы, данные получены из базы OMNIWeb (NASA Space Physics Data Facility, <https://omniweb.gsfc.nasa.gov>). Отмечается, что рост средних значений F10.7 в 2022-2024 гг., связанный с максимумом 25-го солнечного цикла, сопровождается увеличением амплитуды вариаций ПЭС и ростом нормированной дисперсии I_n (рис. 3а, б). Наиболее выраженная реакция наблюдается в зимние периоды и более отчетливо проявляется для станции PETT.

Из рис. 3а, б следует, что многолетний рост дисперсии вариаций ПЭС в 2022-2024 гг. в значительной степени коррелирует с усилением солнечной активности в период максимума 25-го цикла (рис. 3в, г). Кратковременные всплески I_n также совпадают с эпизодами отрицательных значений Dst, что указывает на вклад геомагнитных возмущений в формирование высокочастотной составляющей ПЭС.

Помимо роста максимальных суточных значений в зимнее время (рис. 2) происходит повышение минимальных ночных значений в суточных вариациях по данным станции PETT. По всей видимости, именно указанное повышение вносит наиболее значимый вклад в рост максимальных значений среднегодовых вариаций на временном интервале 2023-2025 гг. (рис. 1). Для станции YUSK значительного повышения не прослеживается, а небольшие (около 50 %) имеющиеся изменения, по всей видимости, также связаны с пиком солнечной активности в августе 2024 г., поскольку в 2025 г. минимальные значения снова понижаются до значений 2022 г.

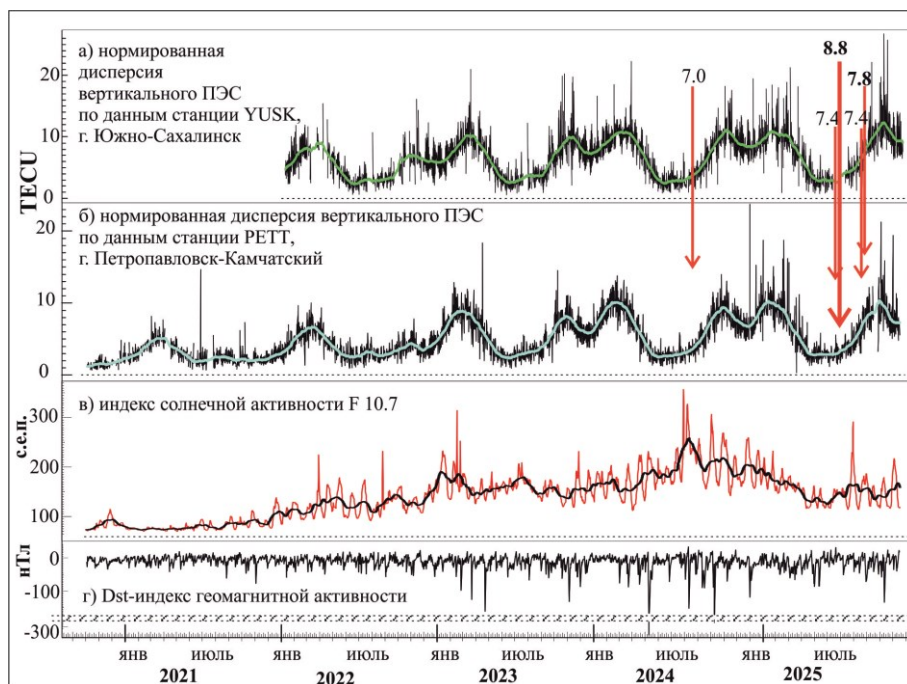


Рис. 3. Вариации нормированной дисперсии вертикального ПЭС по данным ГНСС-станций YUSK (а) и PETT (б); вариации индекса солнечной активности F10.7 (в) и геомагнитного индекса Dst (г). Толстыми линиями показано сглаживание в окне 27 суток.

Заключение

Анализ многолетних рядов вертикального ПЭС по данным станций PETT и YUSK за 2021-2025 гг. выявил устойчивый сезонный ход среднего уровня и дисперсии вариаций, с максимумами возмущенности в зимний период. Рост амплитуды и нормированной дисперсии ПЭС в 2022-2024 гг. согласуется с увеличением солнечной активности и сопровождается эпизодами геомагнитных возмущений. Более выраженные изменения по станции PETT по сравнению с контрольной станцией YUSK указывают на возможное влияние региональных факторов, требующее дальнейшего исследования.

Исследование выполнено в рамках госзадания ИВиС ДВО РАН тема № FWME-2024-0010 и госзадания КамГУ им. Витуса Беринга № FZSS-2025-0007.

Список литературы

1. Гаврилов В.А., Бусс Ю.Ю., Полтавцева Е.В., Морозова Ю.В. Подходы к краткосрочному прогнозированию сейсмической опасности для зоны Авачинского залива (Камчатка) // Russian Journal of Earth Sciences. 2025. № 5. <https://doi.org/10.2205/2025ES001054>
2. Децеровский А.В., Сидорин А.Я. Алгоритм адаптивной оценки сезонных колебаний временных рядов и его тестирование на примере вариаций концентрации CO₂ в атмосфере // Геофизические процессы и биосфера. 2021. Т. 20. № 4. С. 147-174. <https://doi.org/10.21455/GPB2021.4-10>
3. Полтавцева Е.В., Сагарьяров И.А., Гаврилов В.А. и др. Пространственно-временные изменения полного электронного содержания ионосферы перед Шипунским землетрясением (17.08.2024, Mw=7.0). Первые результаты // Вулканизм и связанные с ним процессы: Материалы XXVIII ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2025. С. 220-223.
4. Сагарьяров И.А., Полтавцева Е.В., Гаврилов В.А. и др. Опыт создания программного обеспечения для расчета полного электронного содержания ионосферы по данным ГНСС-приемников // Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов. Труды Десятой Всероссийской научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский: КФ ФИЦ ЕГС РАН, 2025. С. 304-308.
5. Ясюкевич А.С., Черниговская М.А., Мыльникова А.А. и др. Исследование сезонных вариаций ионосферной возмущенности по данным GPS/ГЛОНАСС над регионами Восточной Сибири и Дальнего Востока // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 4. С. 249-262.