
**СВОЙСТВА КОРОТКОПЕРИОДНОЙ ВОЗМУЩЕННОСТИ
ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ
НА СРЕДНИХ И ВЫСОКИХ ШИРОТАХ**

**FEATURES OF SHORT-PERIOD VARIABILITY
OF TOTAL ELECTRON CONTENT AT HIGH AND MIDDLE LATITUDES**

А.С. Ясюкевич

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, annpol@iszf.irk.ru*

A.S. Yasyukevich

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, annpol@iszf.irk.ru*

Аннотация. Представлены результаты сравнительного анализа свойств короткопериодной (с периодами внутренних гравитационных волн) возмущенности полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы на средних (Новосибирск) и высоких (Норильск) широтах за длительный период времени (2003–2020 гг.). Анализируемый период позволяет оценить не только суточные и сезонные вариации возмущенности, но и изменения ее уровня внутри цикла солнечной активности. В динамике короткопериодной возмущенности ПЭС как на средних, так и на высоких широтах отмечается выраженная сезонная зависимость с максимумами в зимнее время. Различие между уровнем возмущенности в зимнее и летнее время составляет около двух раз для Новосибирска и достигает семи раз для Норильска. В динамике возмущенности наблюдается выраженный суточный ход, однако характер суточной зависимости на средне- и высокоширотной станции существенно различается. На высокоширотной станции уровень возмущенности в зимний период строго зависит от солнечной активности. Для среднеширотной станции явная зависимость возмущенности от солнечной активности отсутствует, в годы солнечного максимума, напротив, отмечено небольшое снижение уровня возмущенности. В летний период уровень возмущенности как на средних, так и на высоких широтах остается практически неизменным и не зависит от солнечной активности. Показано, что основные особенности динамики возмущенности схожи на станциях, расположенных на других долготах, за исключением восточно-американского сектора. Полученный результат свидетельствует о том, что короткопериодная возмущенность ПЭС на высоких широтах связана, прежде всего, с изменениями уровня солнечной активности, однако регулярные вариации возмущенности на средних широтах, вероятно, не связаны с гелиофизической активностью. Предположено, что наблюдаемое усиление уровня короткопериодной возмущенности в зимней среднеширотной ионосфере может быть связано с усилением волновой активности в стратосфере.

Ключевые слова: ионосфера; полное электронное содержание; GPS; вариации ионосферы.

Abstract. The study presents the results of comparative analysis of features of a short-period (with periods of internal gravity waves) variability of total electron content (TEC) in the ionosphere at middle (Novosibirsk) and high (Norilsk) latitudes over a long period of time (2003–2020). The period analyzed makes it possible to estimate not only diurnal and seasonal variations in the variability, but also its changes within the solar activity cycle. The level of TEC variability is shown to experience pronounced seasonal variations with maxima in winter months. The difference between the level of variability in winter and summer is about two times for Novosibirsk and up to seven times for Norilsk. The variability features a distinct diurnal variation; however, the diurnal dependence at the mid- and high-latitude stations differs significantly. At high latitudes, the level of variability in the winter period strictly depends on solar activity. For the mid-latitude station, there is no clear dependence of variability level on solar activity; in the years of solar maximum, on the contrary, a slight decrease in the variability is observed. In summer, the level of variability at both middle and high latitudes remains practically unchanged and does not depend on solar activity. The main features in the dynamics of variability are shown to be similar at stations located at other longitudes, except for the East American sector. The result obtained suggests that the short-period TEC variability at high latitudes is primarily related to changes in solar activity, but regular variations in the variability at midlatitudes are probably not associated with heliophysical activity. The observed increase in the level of short-period variability in the winter mid-latitude ionosphere is assumed to be related to an increase in wave activity in the stratosphere.

Keywords: ionosphere; total electron content; GPS; ionospheric variability.

ВВЕДЕНИЕ

Верхняя атмосфера Земли является областью, подверженной как солнечному и магнитосферному воздействию, так и влиянию со стороны нижележащих слоев нейтральной атмосферы. Определяющим фактором в термодинамическом режиме верхней атмосферы является гелио-геомагнитная активность. В то же время исследования свидетельствуют, что причиной наблюдаемых вариаций в ионосфере могут являться атмосферные волны различных пространственно-временных масштабов: акустические, внутренние гравитационные (ВГВ), приливные и планетарные, распространяющиеся из нижней и средней атмосферы [Forbes et al., 2000; Lastovicka, 2006]. ВГВ от источников, расположенных в нижней атмосфере, при определенных условиях могут проникать на большие высоты, вызывая волновые возмущения параметров верхней мезосферы, термосферы и, как следствие, ионосферной плазмы [Hocke, Schlegel, 1996], обеспечивая тем самым процесс взаимосвязи атмосферных слоев. На основе результатов моделирования Liu et al. [2013] продемонстрировали, что метеорологическое воздействие может играть ключевую роль в изменчивости ионосферы от дня ко дню. Совокупность этих воздействий определяет свойства ионосферной возмущенности в различных диапазонах периодов.

Распространение акустических и внутренних гравитационных волн в ионосфере приводит к появлению короткопериодных (с периодами до 5–6 ч) возмущений [Medvedev et al., 2013]. Свойства короткопериодной возмущенности электронной концентрации в F2-слое ионосферы исследовались в работах [Araujo-Pradere et al., 2005; Altadil, 2007; Ratovsky et al., 2015]. Как правило, в качестве критерия оценки возмущенности использовалось нормированное стандартное отклонение выбранного ионосферного параметра в заданном интервале [Araujo-Pradere et al., 2005; Altadil, 2007]. Такой подход применялся также при построении моделей возмущенности [Mendillo et al., 2002]. В работе [Nesterov et al., 2017] для построения индекса относительной возмущенности предложен метод нормировки не на среднее значение (как это делается традиционно), а на СКО. Такой подход позволяет избежать возможной зависимости относительной возмущенности от сезонно-суточного хода исследуемой величины.

Установлено, что в высоких и средних широтах уровень ионосферной возмущенности с периодами ВГВ (от 10 мин до нескольких часов) имеет выраженную сезонную зависимость. В спокойных геомагнитных условиях наименьшая изменчивость была обнаружена в летний период, максимальная — в зимний, а промежуточные значения возмущенности регистрировались в равноденствия. Ratovsky et al. [2015] также подтвердили, что общая относительная изменчивость, полученная по данным дигизонда в Иркутске, имеет четкий сезонный ход с максимумом зимой, минимумом летом и с промежуточными значениями в дни равноденствий.

Выявлено также, что возмущенность характеризуется зависимостью от локального времени (LT).

Например, для среднеширотной станции Эбро показано, что наибольшая изменчивость в F-области регистрируется в ночное время [Altadil, 2007].

Однако открытым остается вопрос о зависимости уровня возмущенности от солнечной активности. Так, Ratovsky et al. [2015] отметили отсутствие явной зависимости уровня короткопериодной изменчивости электронной концентрации в Иркутске от роста солнечной активности. Авторы заключили, что интерпретация полученного результата остается неясной, поскольку активность гравитационных волн возрастает с солнечной активностью [Medvedev et al., 2013]. Вероятно, недостаточно длительный интервал исследования не позволил выявить возможную зависимость.

В настоящей работе представлены результаты сравнительного анализа короткопериодной возмущенности полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы на средних и высоких широтах. Анализируемый период (2003–2020 гг.) включает почти два солнечных цикла, что позволяет оценить не только суточные и сезонные изменения короткопериодной возмущенности ПЭС, но и колебания внутри цикла солнечной активности.

МЕТОД ОЦЕНКИ КОРТОКПЕРИОДНОЙ ВОЗМУЩЕННОСТИ ПЭС

Для исследования использовались данные ПЭС, полученные по измерениям двухчастотных приемников GPS/ГЛОНАСС международной сети IGS, расположенных на близких долготах в среднеширотном (Новосибирск, NVSK, 53° N, 83° E, 50° Glat, 156° Glon) и высокоширотном (Норильск, NRIL, 69° N, 88° E, 64° Glat, 162° Glon) регионах. Скорректированные геомагнитные координаты станций (Glat, Glon) рассчитаны согласно модели IGRF на 2010 г. [<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/cgm.html>].

На основе фазовых и кодовых измерений рассчитывались ряды вертикального абсолютного ПЭС по методике, описанной в работе [Yasyukevich et al., 2020b]. Данная методика позволяет получать длительные ряды неотрицательных значений абсолютного ПЭС с учетом дифференциальных кодовых задержек. Временное разрешение полученных значений ПЭС составляет 15 мин. Оценки, приведенные в работе [Yasyukevich et al., 2020b], показывают, что отклонение значений ПЭС, получаемых по указанной методике, от значений ПЭС, получаемых альтернативными методами (например, по глобальным ионосферным картам), не превышает 1–2.5 TECU. Это соответствует расхождению между значениями ПЭС по данным карт различных лабораторий.

Для выделения короткопериодных вариаций из рядов ПЭС применялась методика, описанная в работе [Ratovsky et al., 2015], применявшаяся для анализа вариаций максимальной электронной концентрации F2-слоя по данным ионизонда в Иркутске. Применение данной методики обосновано в том числе возможностью сравнения результатов, полученных для ПЭС и N_mF2 . Методика включает в себя следующие этапы:

1. Для каждого момента LT определялось нормированное отклонение ПЭС (TEC) от 27-дневного медианного значения:

$$\Delta TEC(LT) = \frac{TEC(LT) - \langle TEC(LT) \rangle_{27}}{\langle TEC(LT) \rangle_{27}}$$

2. Для разделения вкладов длиннопериодных ($\Delta TEC(LT)_{LONG}$) и короткопериодных ($\Delta TEC(LT)_{IGW}$) вариаций проводилась фильтрация полученных рядов скользящим окном 6 ч. Низкочастотные вариации ПЭС (ΔTEC_{LONG} , с периодами более 6 ч) связаны с ионосферной изменчивостью от дня ко дню, а также с приливными вариациями с суточным и полусуточным составляющими. Для каждого момента времени возмущенность в диапазонах ВГВ определялась как

$$\Delta TEC(LT)_{IGW} = \Delta TEC(LT) - \Delta TEC(LT)_{LONG}$$

Таким образом, если принять во внимание временное разрешение исходных данных ПЭС, диапазон периодов полученных возмущений составляет 0.5–6 ч. Следует отметить, что временное разрешение исходных данных вертикального ПЭС не позволяет оценить вклад наиболее мелкомасштабных акустических возмущений, поэтому в настоящей работе под короткопериодной возмущенностью понимаются вариации, имеющие периоды, близкие к ВГВ.

3. Для определения коэффициента возмущенности рассчитывалось стандартное отклонение σ величин $\Delta TEC(LT)_{IGW}$ на заданном интервале: для каждого дня были определены три коэффициента возмущенности, когда СКО рассчитывалось отдельно только в дневное либо только в ночное время, а также в течение всех суток. Для разделения дневных и ночных условий использовалось время прохождения солнечного терминатора на высоте 100 км.

С целью получения суточно-сезонной динамики возмущенности для каждого момента LT рассчитывалось СКО значений $\sigma TEC(LT)_{IGW}$ по всем анализируемым годам.

4. Целью настоящей работы являлось исследование свойств возмущенности ПЭС в спокойных геомагнитных условиях. Поэтому из рядов возмущенности исключались резкие всплески, превышающие порог 2σ от 27-дневной скользящей медианы. Такие всплески могут быть связаны с либо с геомагнитными возмущениями, либо со сбоями в оценке ПЭС.

Для выделения сезонных вариаций в динамике коэффициентов возмущенности проводилось сглаживание полученных рядов с периодом 27 сут.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

На рис. 1 представлены ряды коэффициентов короткопериодной возмущенности ПЭС, рассчитанных как σ величин $\Delta TEC(LT)_{IGW}$ за одни локальные сутки, а также их сглаженные с периодом 27 сут значения (серая кривая) для станций Новосибирск (NVSK, внизу) и Норильск (NRIL, вверху) в 2005 г.

Сглаженные с периодом 27 сут коэффициенты отражают сезонные вариации возмущенности. Дополнительно нанесены сглаженные коэффициенты возмущенности, рассчитанные отдельно только в днев-

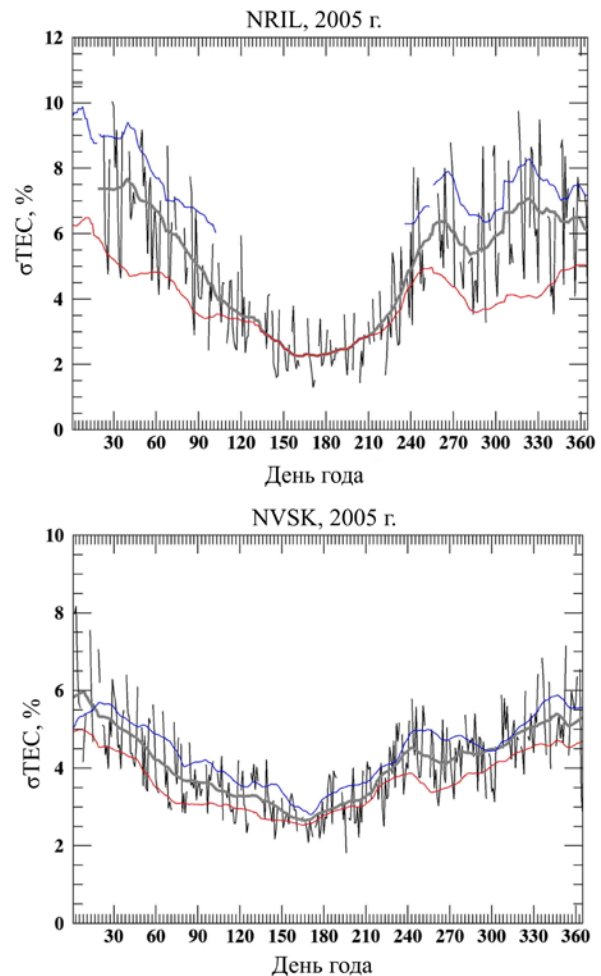


Рис. 1. Ряды коэффициентов короткопериодной возмущенности ПЭС, а также их сглаженные с периодом 27 сут значения (серая кривая) для ст. Новосибирск (NVSK, внизу) и Норильск (NRIL, вверху) в 2005 г. Дополнительно нанесены сглаженные коэффициенты возмущенности, рассчитанные только в дневное (красная кривая) и только в ночное (синяя кривая) местное время

ное (красная кривая) и только в ночное (синяя кривая) местное время.

Видно, что уровень возмущенности испытывает значительные регулярные суточные и сезонные колебания. Наименьшие значения коэффициента TEC_{IGW} регистрируются на обеих широтах в летние месяцы. Данный результат согласуется с полученными ранее результатами для возмущенности электронной концентрации в области максимума ионосферы.

Отметим, что на среднеширотной станции NVSK уровень возмущенности в ночное время лишь незначительно (в 1.2–1.3 раза) превышает уровень возмущенности в дневные часы. При этом в летние месяцы различие между дневными и ночными значениями уменьшается.

На высокоширотной станции разница между дневной и ночной возмущенностью выражена существенно сильнее — в среднем возмущенность в ночное время может более чем в два раза превышать возмущенность в дневное время. В летние месяцы ночная возмущенность не оценивалась, поскольку в этот период на высоте от 100 км и выше наблюдается полярный день.

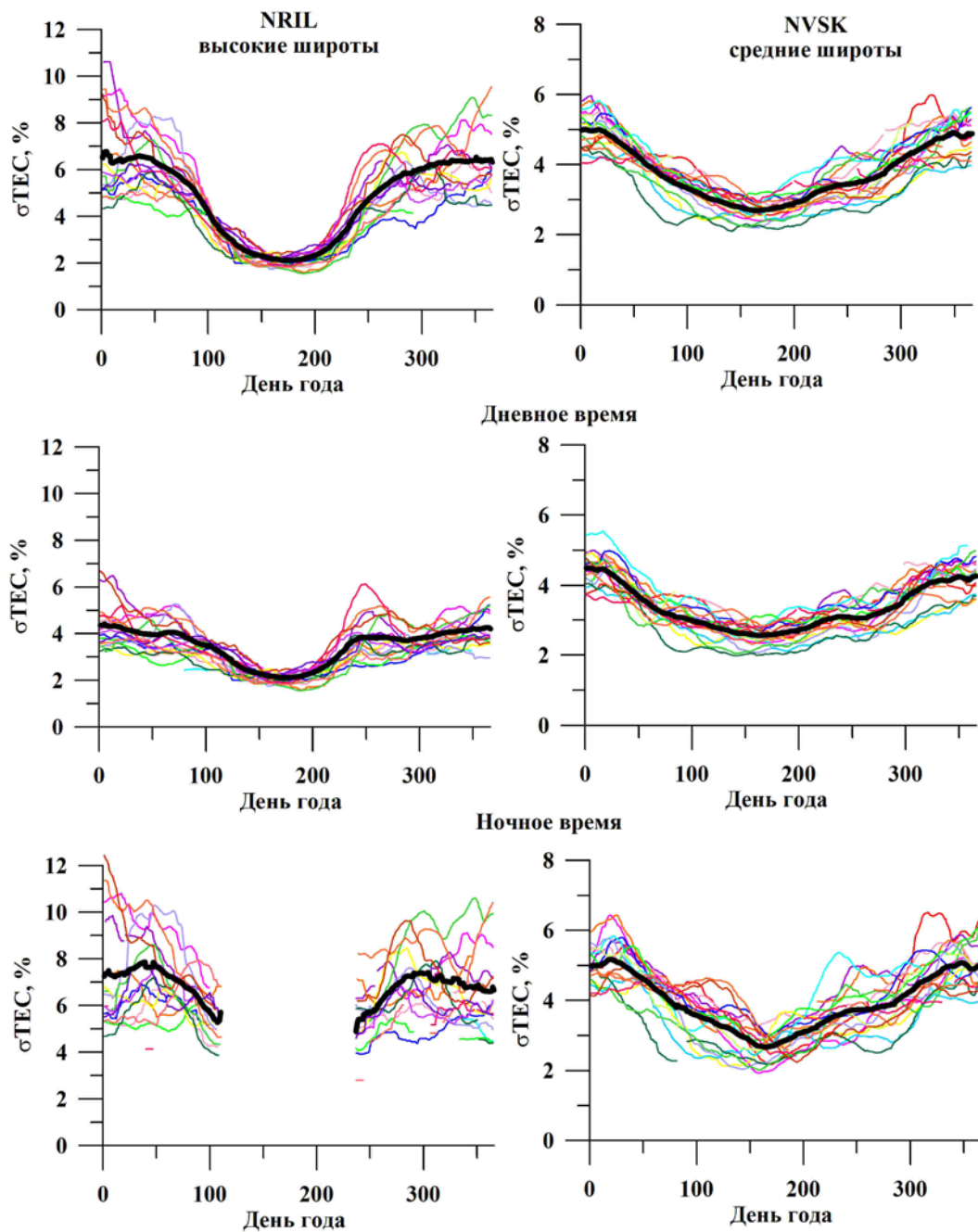


Рис. 2. Сезонные вариации короткопериодной возмущенности ПЭС в разные годы для ст. Норильск (NRIL, слева) и Новосибирск (NVSK, справа). Толстой кривой нанесены вариации, полученные усреднением по всем исследуемым годам

Сезонные вариации коэффициента короткопериодной возмущенности в разные годы приведены на рис. 2 для Норильска (слева) и Новосибирска (справа) за 2003–2020 гг. Толстой линией нанесены сезонные вариации, усредненные по всем анализируемым годам. На верхней панели показаны сезонные вариации для возмущенности, рассчитанной за локальные сутки, на средней — только в дневное время, на нижней — в ночное.

В динамике возмущенности отмечается ярко выраженный сезонный ход с максимумами в зимнее время. Такое поведение наблюдается регулярно из года в год. Различие между уровнем возмущенности в зимнее и летнее время составляет около двух раз для Новосибирска и достигает семи раз для Но-

рильска. Сезонные различия отчетливо наблюдаются как в ночное, так и в дневное время, однако более выражены ночью.

Как видно из рис. 2, поведение возмущенности ПЭС в летнее и зимнее время может существенно различаться. Поэтому для оценки влияния солнечной активности на уровень короткопериодной возмущенности ПЭС для каждого исследуемого года были рассчитаны средние значения коэффициентов возмущенности отдельно в летний и зимний периоды.

На рис. 3 показаны изменения зимних и летних средних значений возмущенности в сравнении с вариациями солнечной активности (индекс $F10.7$). На верхней панели возмущенность рассчитывалась за полные локальные сутки, на средней — только в дневное

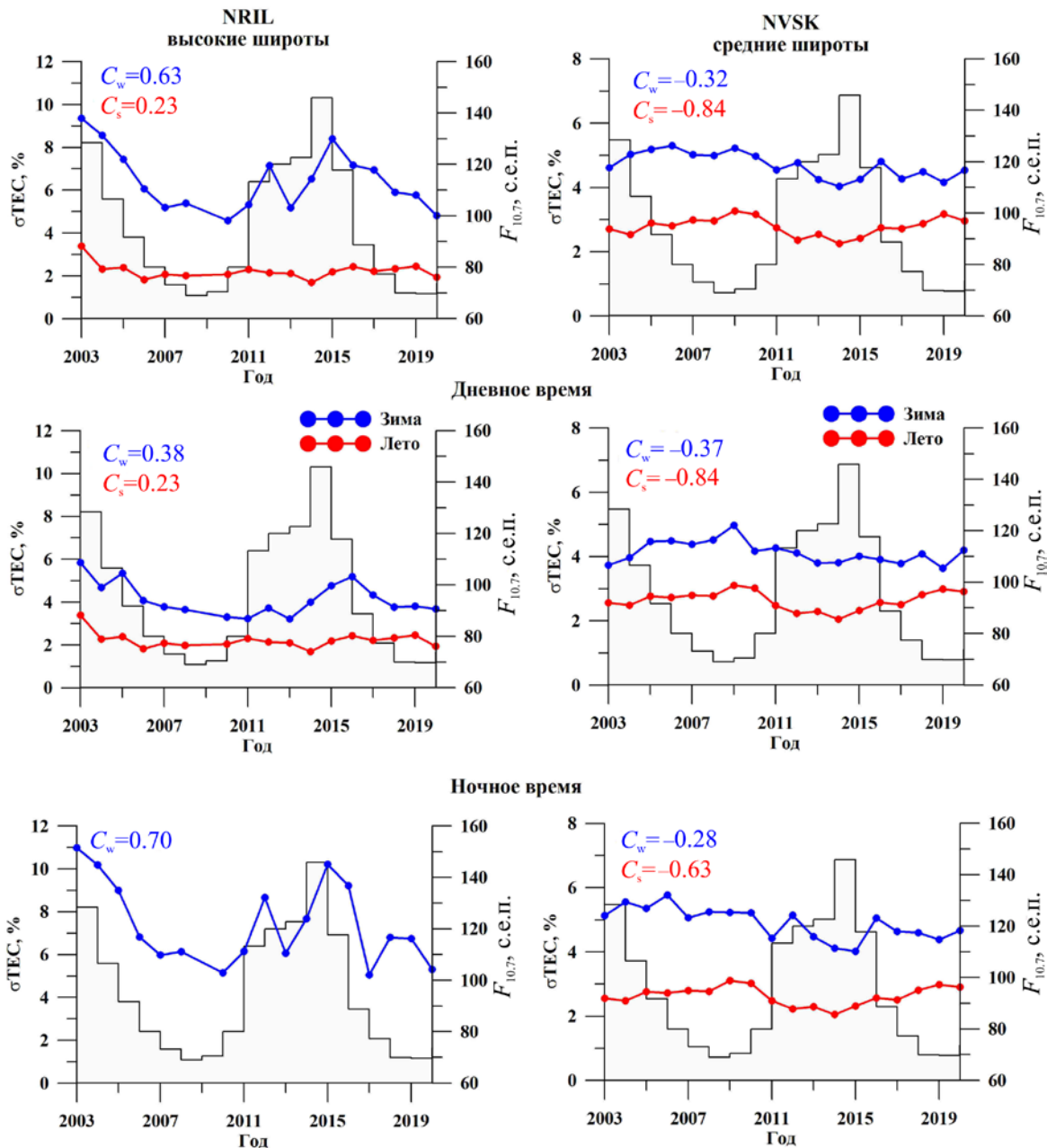


Рис. 3. Динамика средних значений возмущенности ПЭС в зимнее (черный) и летнее (серый) время в сравнении с изменением среднегодовых значений $F_{10.7}$ (серые столбики) в Норильске (слева) и Новосибирске (справа). Цифрами на панелях приведены значения соответствующих коэффициентов корреляции

время, на нижней — только в ночное. Цифрами на панелях приведены значения коэффициентов корреляции между вариациями индекса $F_{10.7}$ и индексом возмущенности в зимний (C_w) и летний (C_s) периоды соответственно.

Видно, что на высокоширотной станции NRIL уровень возмущенности в зимний период зависит от солнечной активности, причем в ночное время эта зависимость выражена более явно (коэффициент корреляции C_w достигает 0.7). С уменьшением солнечной активности возмущенность снижается на ~50%. Это говорит о том, что интенсивность короткопериодной возмущенности ПЭС на высоких широтах определяется уровнем солнечной активности.

Для среднеширотной станции NVSK подобной зависимости от уровня $F_{10.7}$ не наблюдается. Это

согласуется с результатами работы Ratovsky et al. [2015], полученными для возмущенности электронной концентрации над Иркутском. Данный результат свидетельствует, что регулярные вариации ионосферной возмущенности в диапазоне ВГВ на средних широтах, вероятно, не связаны с гелиофизической активностью. В годы высокой солнечной активности, напротив, можно отметить некоторое снижение уровня возмущенности.

Отметим, что уровень возмущенности в летние месяцы на высоких широтах остается практически неизменным и составляет около 2% вне зависимости от солнечной активности. Отсутствует также значимая корреляция между значениями $F_{10.7}$ и индексом возмущенности ($C_s \sim 0.2$). Для среднеширотной станции в летний период отмечается выраженная антикорре-

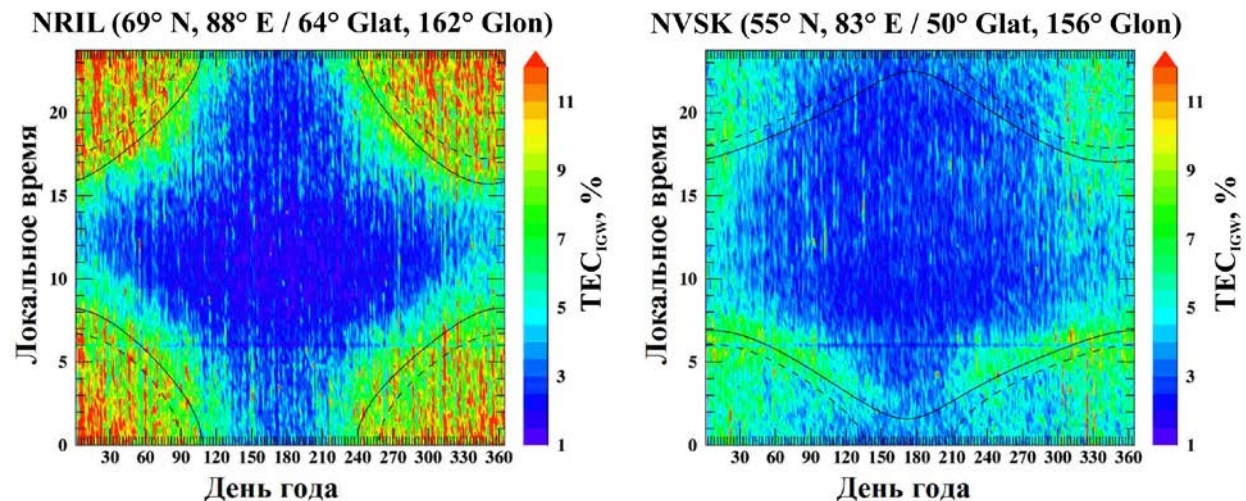


Рис. 4. Суточно-сезонные вариации короткопериодной возмущенности ПЭС в Норильске (слева) и Новосибирске (справа). Линиями показаны моменты прохождения солнечного терминатора на высотах 100 (сплошная) и 300 км (штриховая)

ляция между уровнем солнечной активности и возмущенностью (C_s более -0.8). Интересно отметить, что в летнее время средний уровень возмущенности на среднеширотной станции NVSK оказывается даже немного выше, чем на высокоширотной станции NRIL.

Возможным объяснением снижения уровня относительной возмущенности в годы солнечного максимума на средних широтах может быть тот факт, что при росте солнечной активности фотохимические процессы начинают преобладать над динамическими (волновыми возмущениями) и ионосферная плазма становится более устойчивой к слабым волновым возмущениям. Ослабление фотохимических процессов в ночное время также может объяснять превышение ночной возмущенности над дневной на средних широтах [Rishbeth, Mendillo, 2001; Altadil, 2007].

На рис. 4 представлены суточно-сезонные вариации короткопериодной возмущенности ПЭС в Норильске и Новосибирске за 2003–2020 гг. Для получения данных распределений для каждого момента LT рассчитывались СКО значений $\Delta TEC(LT)_{IGW}$ по всем исследуемым годам.

На обеих станциях можно отметить выраженный суточно-сезонный ход возмущенности, однако характер этой зависимости существенно различается.

На высокоширотной станции NRIL возмущенность значительно возрастает в ночное время, сразу после прохождения солнечного терминатора (СТ). Это, вероятно, связано с проявлениями авроральной активности. В ночное время станция оказывается ближе к области аврорального овала, расширяющегося в сторону более низких широт, который характеризуется развитием интенсивных мелкомасштабных ионосферных возмущений. Таким образом, короткопериодная возмущенность на высокоширотной станции в ночное время определяется в основном процессами в авроральной области.

На среднеширотной станции NVSK выделяются два четко выраженных пика возмущенности вблизи

времен прохождения СТ, причем уровень возмущенности вблизи утреннего терминатора выше, чем около вечернего.

Движение СТ является регулярным источником волновых возмущений в атмосфере и ионосфере, вызывая генерацию волн, а также возникновение неустойчивостей и флуктуаций в ионосферной плазме [Francis, 1974]. Авторы работ [Afraimovich et al., 2009a, b] обнаружили, что движение СТ сопровождается генерацией в ионосфере особого типа среднемасштабных возмущений — волновых пакетов, проявляющихся в форме узкополосных колебаний ПЭС. Предложена модель генерации магнито-гидродинамических возмущений плазмы в системе ионосфера–плазмосфера. Дальнейшие исследования показали [Edemskiy, Yasyukevich, 2011], что возмущения ПЭС, связанные с прохождением СТ, могут иметь более сложную структуру, являясь, по-видимому, суперпозицией колебаний ионосферной плазмы, вызванных прохождением не только магнито-гидродинамических, но и гравитационных волн. Таким образом, наибольший вклад в уровень короткопериодной возмущенности ПЭС на средних широтах дают вариации, связанные с прохождением СТ.

Отметим, однако, что увеличение уровня возмущенности регистрируется не только вблизи СТ, но и в течение всего ночного времени. Кроме того, в зимние периоды возмущенность остается повышенной в течение всех суток.

Следует отметить, что результаты, полученные в данной работе, могут быть применимы для пунктов, расположенных вблизи исследуемого долготного региона, поскольку расхождение между геомагнитными и географическими широтами сильно различается в зависимости от долготы. В этой связи было проведено исследование суточно-сезонных распределений возмущенности на близких географических широтах, но в других долготных секторах, характеризующихся различными отклонениями между геомагнитными и географическими координатами. На рис. 5 приведены распределения для периода

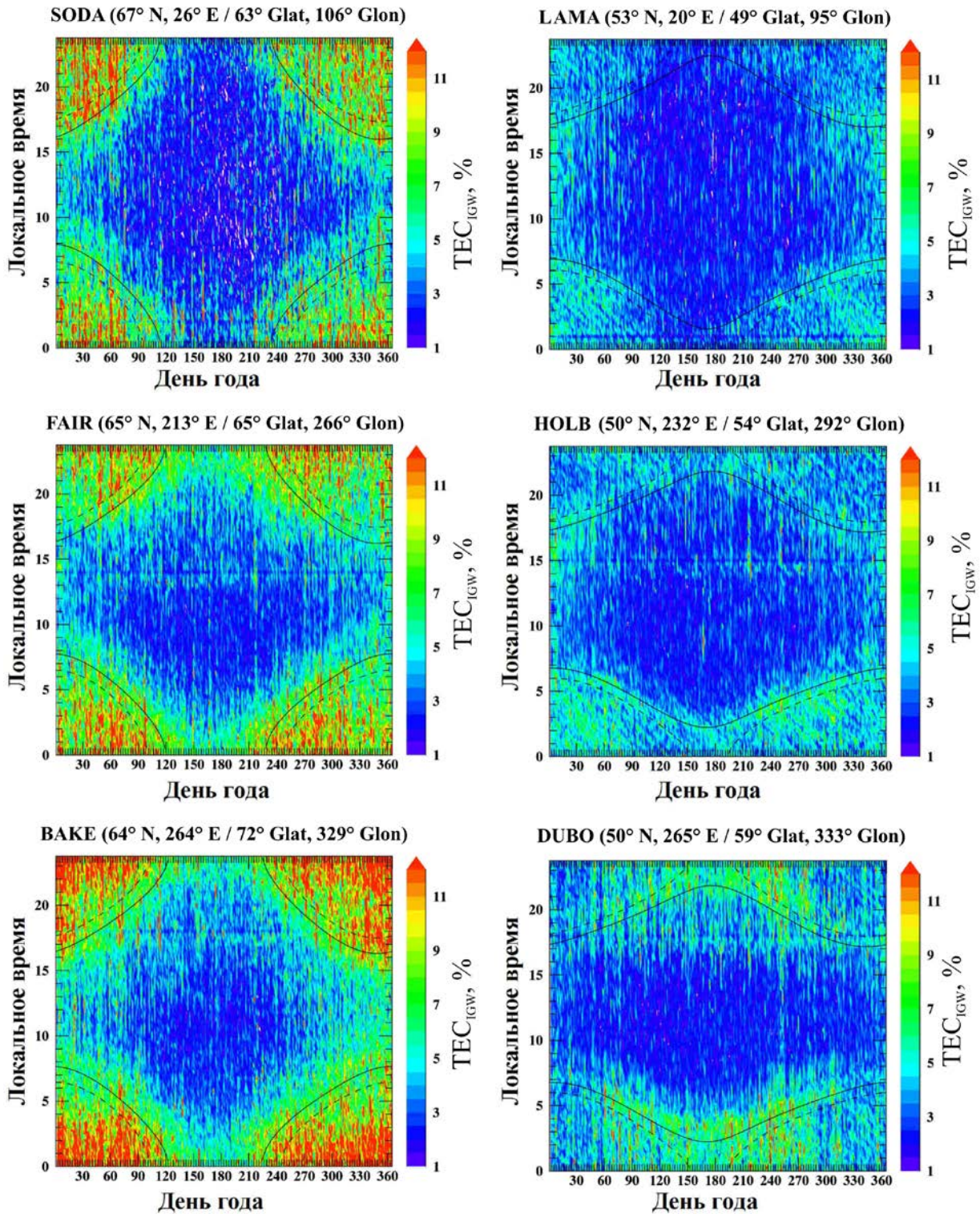


Рис. 5. Суточно-сезонные вариации короткопериодной возмущенности ПЭС в европейском (вверху), западно-американском (по центру) и восточно-американском (снизу) секторах на высоких (слева) и средних (справа) широтах. Названия станций и их координаты приведены на соответствующих панелях. Линиями показаны моменты прохождения солнечного терминатора на высотах 100 (сплошная) и 300 км (штриховая)

2010–2020 гг., аналогичные представленным на рис. 4, для пар станций, расположенных в европейском (LAMA, SODA), западно-американском (FAIR, HOLB) и восточно-американском (ВАКЕ, DUBO) секторах.

Видно, что динамика возмущенности в целом имеет схожий характер в разных долготных секто-

рах. Наибольшие отличия отмечаются для пунктов в восточно-американском секторе, где станции наиболее близко к геомагнитному полюсу. Так, уровень возмущенности в ночное время на станции ВАКЕ существенно выше, чем на других рассмотренных высокоширотных станциях. А на среднеши-

ротной станции DUBO отмечается возрастание возмущенности в ночное время (сразу после прохождения СТ) не только в зимний, но и в летний периоды. Однако, исходя из геомагнитной широты данной станции, ее следует относить скорее к высокоширотным, чем среднеширотным станциям. Очевидно, что основные выводы относительно поведения возмущенности, полученные в настоящей работе, следует применять к данному долготному региону с осторожностью, обязательно учитывая геомагнитную широту станции. В других рассмотренных долготных секторах полученные выше результаты будут справедливы.

ОБСУЖДЕНИЕ

Регулярно наблюдаемые значительные сезонные вариации возмущенности ПЭС на средних широтах с максимумом зимой и минимумом летом не коррелируют с изменениями солнечной активности. Источником этой изменчивости могут являться процессы в нижележащей атмосфере.

В качестве причин сезонных различий уровня ионосферной ВГВ-возмущенности рассматриваются следующие факторы: сезонные вариации фотохимического режима [Araujo-Pradere et al., 2005] и изменения, связанные с метеорологической активностью [Lastovicka, 2006; Altadill, 2007].

Одним из источников ВГВ в зимней полярной стратосфере и нижней мезосфере является циркумполярный вихрь [Wu, Waters, 1996; Whiteway et al., 1997]. Вихрь представляет собой крупномасштабную ячейку циклонической циркуляции, которая формируется в холодной воздушной массе над полярной областью и охватывает верхнюю тропосферу и стратосферу. Циркумполярный вихрь сопровождается развитием струйного течения — узкого, четко ограниченного потока атмосферного газа, характеризующегося высокими скоростями (до 100 м/с и более) и большими вертикальными и горизонтальными сдвигами ветра. Установлено, что сдвиговые неустойчивости в струйном течении приводят к генерации на высотах стратосферы атмосферных волн масштаба ВГВ (с периодами от десятков минут до нескольких часов) [Shrynev et al., 2015]. В работе [Shrynev et al., 2019] показано, что до 10–15 % от полной энергии струйного течения может уходить на генерацию ВГВ. Frissell et al. [2016] пришли к выводу, что не имеется четкой корреляции между уровнем возмущенности ионосферы средних широт и индексами геомагнитной активности (*AE* и *SYM-H*), в то же время корреляция с динамикой циркумполярного вихря была существенной. Связь усиления зимней ионосферной возмущенности с динамикой стратосферного струйного течения над регионами Евразийского континента отмечена также в работе [Chernigovskaya et al., 2018]. Yasyukevich et al. [2020a] выявлено, что имеется отчетливая корреляция между индексами короткопериодной возмущенности в стратосфере, ионосфере и на высоте мезопаузы.

Таким образом, наблюдаемое усиление уровня короткопериодной возмущенности в среднеширот-

ной ионосфере может быть связано с метеорологическими факторами, а именно с усилением волновой активности в стратосфере, связанной с развитием зимнего циркумполярного вихря.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проанализированы свойства короткопериодной возмущенности ПЭС ионосферы на средних и высоких широтах. Анализируемый период включает почти два солнечных цикла (2003–2020 гг.), что позволило оценить не только суточные и сезонные вариации возмущенности, но и изменения ее уровня в зависимости от солнечной активности.

Показано, что в динамике возмущенности отмечается ярко выраженный сезонный ход с максимумами в зимнее время. Различие между уровнем возмущенности в зимнее и летнее время составляет около двух раз для Новосибирска и достигает семи раз для Норильска. Сезонные различия отчетливо наблюдаются как в ночное, так и в дневное время, однако более выражены ночью.

В динамике возмущенности наблюдается выраженный суточный ход, однако характер суточной зависимости на средне- и высокоширотной станциях существенно различается. На высокоширотной станции возмущенность значительно возрастает в ночное время, сразу после прохождения солнечного терминатора, что, вероятно, связано с проявлениями авроральной активности, усиливающейся в ночное время. На среднеширотной станции в суточном ходе возмущенности выделяются два четко выраженных пика вблизи времени прохождения солнечных терминаторов. Повышенные значения уровня возмущенности регистрируются также в зимние периоды в течение всех суток.

На высокоширотной станции NRIL уровень возмущенности в зимний период строго зависит от солнечной активности, причем в ночное время эта зависимость выражена более явно. От максимума к минимуму солнечной активности уровень возмущенности в зимнее время снижается более чем на 50 %. Для среднеширотной станции NVSK явная зависимость возмущенности от солнечной активности отсутствует, в годы солнечного максимума, напротив, отмечено небольшое снижение уровня возмущенности. Полученный результат свидетельствует о том, что короткопериодная возмущенность ПЭС на высоких широтах в ночное время связана, прежде всего, с изменениями уровня солнечной активности, однако регулярные сезонные вариации возмущенности на средних широтах, вероятно, не связаны с гелиофизической активностью.

В летний период уровень возмущенности на высоких широтах остается практически неизменным и составляет около 2 % вне зависимости от солнечной активности. На среднеширотной станции в летний период отмечается выраженная антикорреляция между уровнем солнечной активности и возмущенностью ПЭС.

Сделано предположение, что наблюдаемое усиление уровня короткопериодной возмущенности

в среднеширотной ионосфере может быть связано с метеорологическими факторами, а именно с усилением волновой активности в стратосфере, связанной с развитием зимнего циркумполярного вихря.

Полученные результаты могут иметь практическую ценность для оперативного прогнозирования состояния радиоканала и ухудшения работы радиотехнических систем, а также использоваться при создании и тестировании динамических моделей ионосферы в зависимости от различных факторов. Понимание свойств регуляторной возмущенности ионосферы также имеет ценность при исследовании воздействий различных нестационарных событий на ионосферу.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 20-77-00070).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Afraimovich E.L., Edemskiy I.K., Leonovich A.S., et al. MHD nature of night-time MSTIDs excited by the solar terminator. *Geophys. Res. Lett.* 2009a. Vol. 36, L15106. DOI: [10.1029/2009GL039803](https://doi.org/10.1029/2009GL039803).
- Afraimovich E.L., Edemskiy I.K., Voeykov S.V., et al. Spatio-temporal structure of the wave packets generated by the solar terminator. *Adv. Space Res.* 2009b. Vol. 44. P. 824–835. DOI: [10.1016/j.asr.2009.05.017](https://doi.org/10.1016/j.asr.2009.05.017).
- Altadill D. Time/altitude electron density variability above Ebro, Spain. *Adv. Space Res.* 2007. Vol. 39. P. 962–969. DOI: [10.1016/j.asr.2006.05.031](https://doi.org/10.1016/j.asr.2006.05.031).
- Araujo-Pradere E.A., Fuller-Rowell T.J., Codrescu M.V., Bilitza D. Characteristics of the ionospheric variability as a function of season latitude local time and geomagnetic activity. *Radio Sci.* 2005. Vol. 40, RS5009. DOI: [10.1029/2004RS003179](https://doi.org/10.1029/2004RS003179).
- Chernigovskaya M.A., Shpynev B.G., Ratovsky K.G., et al. Ionospheric response to winter stratosphere/lower mesosphere jet stream in the Northern Hemisphere as derived from vertical radio sounding data. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018. Vol. 180. P. 126–136. DOI: [10.1016/j.jastp.2017.08.033](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.08.033).
- Edemskiy I.K., Yasyukevich Y.V. Duration of wave disturbances generated by solar terminator in magneto-conjugate areas. *Proc. XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium*. Istanbul, Turkey, 2011. P. 1–4. DOI: [10.1109/URSIGASS.2011.6051003](https://doi.org/10.1109/URSIGASS.2011.6051003).
- Forbes J.M., Palo S.E., Zhang X. Variability of the ionosphere. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2000. Vol. 62, iss. 8. P. 685–693. DOI: [10.1016/S1364-6826\(00\)00029-8](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(00)00029-8).
- Francis S.H. A theory of medium-scale traveling ionospheric disturbances. *J. Geophys. Res.* 1974. Vol. 79, iss. 34. P. 5245–5260. DOI: [10.1029/JA079i034p05245](https://doi.org/10.1029/JA079i034p05245).
- Frissell N.A., Baker J.B.H., Ruohoniemi J.M., et al. Sources and characteristics of medium-scale traveling ionospheric disturbances observed by high-frequency radars in the North American sector. *J. Geophys. Res.* 2016. Vol. 121. P. 3722–3739. DOI: [10.1002/2015JA022168](https://doi.org/10.1002/2015JA022168).
- Hocke K., Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982–1995. *Ann. Geophys.* 1996. Vol. 14. P. 917–940. DOI: [10.1007/s00585-996-0917-6](https://doi.org/10.1007/s00585-996-0917-6).
- Lastovicka J. Forcing of the ionosphere by waves from below. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2006. Vol. 68. P. 479–497. DOI: [10.1016/j.jastp.2005.01.018](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2005.01.018).
- Liu H.-L., Yudin V.A., Roble R. G. Day-to-day ionospheric variability due to lower atmosphere perturbations. *Geophys. Res. Lett.* 2013. Vol. 40. P. 665–670. DOI: [10.1002/grl.50125](https://doi.org/10.1002/grl.50125).
- Medvedev A.V., Ratovsky K.G., Tolstikov M.V., et al. Studying of the spatial-temporal structure of wavelike ionospheric disturbances on the base of Irkutsk incoherent scatter radar and digisonde data. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2013. Vol. 105. P. 350–357. DOI: [10.1016/j.jastp.2013.09.001](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.09.001).
- Mendillo M., Rishbeth H., Roble R.G., Wroten J. Modelling F2-layer seasonal trends and day-to-day variability driven by coupling with the lower atmosphere. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2002. Vol. 64. P. 1911–1931. DOI: [10.1016/S1364-6826\(02\)00193-1](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00193-1).
- Nesterov I.A., Andreeva E.S., Padokhin A.M., et al. Ionospheric perturbation indices based on the low- and high-orbiting satellite radio tomography data. *GPS Solut.* 2017. Vol. 21. P. 1679–1694. DOI: [10.1007/s10291-017-0646-1](https://doi.org/10.1007/s10291-017-0646-1).
- Ratovsky K.G., Medvedev A.V., Tolstikov M.V. Diurnal, seasonal and solar activity pattern of ionospheric variability from Irkutsk Digisonde data. *Adv. Space Res.* 2015. Vol. 55. P. 2041–2047. DOI: [10.1016/j.asr.2014.08.001](https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.08.001).
- Rishbeth H., Mendillo M. Patterns of F2-layer variability. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2001. Vol. 63. P. 1661–1680. DOI: [10.1016/S1364-6826\(01\)00036-0](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(01)00036-0).
- Shpynev B.G., Churilov S.M., Chernigovskaya M.A. Generation of waves by jet-stream instabilities in winter polar stratosphere/mesosphere. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2015. Vol. 136(B). P. 201–215. DOI: [10.1016/j.jastp.2015.07.005](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.07.005).
- Shpynev B.G., Khabituev D.S., Chernigovskaya M.A., Zorkal'tseva O.S. Role of winter jet stream in the middle atmosphere energy balance. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2019. Vol. 188. P. 1–10. DOI: [10.1016/j.jastp.2019.03.008](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.03.008).
- Whiteway J.A., Duck T.J., Donovan D.P., et al. Measurements of gravity wave activity within and around the Arctic stratospheric vortex. *Geophys. Res. Lett.* 1997. Vol. 24, iss. 11. P. 1387–1390. DOI: [10.1029/97GL01322](https://doi.org/10.1029/97GL01322).
- Wu D.L., Waters J.W. Satellite observations of atmospheric variances: A possible indication of gravity waves. *Geophys. Res. Lett.* 1996. Vol. 23, iss. 24. P. 3631–3634. DOI: [10.1029/96GL02907](https://doi.org/10.1029/96GL02907).
- Yasyukevich A., Medvedeva I., Sivtseva V., et al. Strong Interrelation between the Short-Term Variability in the Ionosphere, Upper Mesosphere, and Winter Polar Stratosphere. *Remote Sens.* 2020a. Vol. 12, 1588. DOI: [10.3390/rs12101588](https://doi.org/10.3390/rs12101588).
- Yasyukevich Yu., Mylnikova A., Vesnin A. GNSS-Based Non-Negative Absolute Ionosphere Total Electron Content, its Spatial Gradients, Time Derivatives and Differential Code Biases: Bounded-Variable Least-Squares and Taylor Series. *Sensors.* 2020b. Vol. 20, 5702. DOI: [10.3390/s20195702](https://doi.org/10.3390/s20195702).
- URL: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/cgm.html> (дата обращения 1 мая 2020 г.).

Как цитировать эту статью:

Ясюкевич А.С. Свойства короткопериодной возмущенности полного электронного содержания на средних и высоких широтах. *Солнечно-земная физика*. 2021. Т. 7, № 4. С. 75–83. DOI: [10.12737/szf-74202107](https://doi.org/10.12737/szf-74202107).