
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВОЗМУЩЕННОСТИ В СРЕДНЕШИРОТНОЙ СТРАТОСФЕРЕ И ИОНОСФЕРЕ В ЗИМНИЕ ПЕРИОДЫ

COMPARATIVE ANALYSIS OF VARIABILITY IN THE MID-LATITUDE STRATOSPHERE AND IONOSPHERE IN WINTER PERIODS

А.С. Ясюкевич *Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, annpol@iszf.irk.ru***А.М. Веснин** *Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, artem_vesnin@iszf.irk.ru***A.S. Yasyukevich***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, annpol@iszf.irk.ru***A.M. Vesnin***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, artem_vesnin@iszf.irk.ru*

Аннотация. В работе проведен совместный анализ пространственно-временной динамики интенсивности ионосферных и стратосферных возмущений (с масштабами, характерными для внутренних гравитационных волн) на разных долготах средних широт Северного полушария. Анализируются зимние периоды 2012–2013 и 2018–2019 гг., когда происходили сильные внезапные стратосферные потепления (ВСП). Показано, что в области существования зимнего циркумполярного вихря в стратосфере происходит увеличение возмущенности в ограниченном широтном интервале 40° – 60° N. В условиях ВСП прекращается генерация возмущений в стратосфере, что проявляется в значительном снижении индекса стратосферной возмущенности. Подобную динамику демонстрируют и широтно-временные распределения индекса возмущенности полного электронного содержания ионосферы. Уровень ионосферной возмущенности на средних широтах существенно снижается после ВСП. Уменьшение ионосферной возмущенности можно объяснить уменьшением волновой генерации в стратосфере, связанным с разрушением циркумполярного вихря в периоды ВСП.

Ключевые слова: ионосфера, полное электронное содержание, возмущенность, внутренние гравитационные волны, стратосфера, циркумполярный вихрь, внезапные стратосферные потепления, атмосферо-ионосферное взаимодействие.

ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени установлено, что степень воздействия источников в приземных атмосферных слоях на состояние ионосферной плазмы может быть достаточно высокой [Forbes et al., 2000]. Одной из причин наблюдаемых вариаций в ионосфере являются внутренние гравитационные волны (ВГВ), распространяющиеся из нижней и средней атмосферы [Lastovicka, 2006] и осуществляющие динамическую связь между различными атмосферными слоями [Yigit, Medvedev, 2016].

Циркумполярный вихрь (ЦПВ) — это крупномасштабная ячейка циркуляции циклонического типа, которая формируется в холодной воздушной массе над полярной областью в верхней стратосфере

Abstract. In this work, we perform a joint analysis of the spatial-temporal dynamics of ionospheric and stratospheric variability (with scales characteristic of internal gravity waves) at different longitudes of midlatitudes of the Northern Hemisphere. We analyze the winter periods of 2012–2013 and 2018–2019 when strong midwinter sudden stratospheric warmings (SSWs) occurred. An increase in the variability in the stratosphere is shown to occur in a limited latitude interval 40° – 60° N in the region of existence of a winter circumpolar vortex. Under SSW conditions, the generation of wave disturbances in the stratosphere ceases manifesting itself in a significant decrease in the stratospheric variability index. Similar behavior is noted in the spatial-temporal dynamics of the index of the total electron content variability. The level of ionospheric variability at midlatitudes decreases significantly after SSW peaks. The decrease in the ionospheric variability can be explained by a reduction in wave generation in the stratosphere, associated with the destruction of the circumpolar vortex during SSWs.

Keywords: ionosphere, total electron content, variability, internal gravity waves, stratosphere, circumpolar vortex, sudden stratospheric warmings, atmosphere-ionosphere interaction.

и нижней мезосфере в зимние месяцы. Исследования показали, что ЦПВ (и ассоциированное с ним струйное течение) является источником волновых возмущений [Wu, Waters, 1996; Gerrard et al., 2011; Friswell et al., 2016; Liu et al., 2017]. Shpynev et al. [2015] показали, что внутри ЦПВ создаются условия для возникновения неустойчивостей бароклинного типа, которые генерируют атмосферные волны различных масштабов, в том числе и ВГВ. Теоретические расчеты позволили оценить, что на генерацию ВГВ может уходить до 10–15 % от полной энергии струйного течения [Shpynev et al., 2019].

ВГВ, генерируемые выше стратосферы, являются устойчивыми к турбулентному затуханию и могут распространяться под разными углами вверх на боль-

шие расстояния [Kaifler et al., 2015], вызывая волновые возмущения в верхней мезосфере, термосфере и, как следствие, в ионосферной плазме [Носке, Schlegel, 1996]. Сопоставление волновой возмущенности в параметрах нейтральной атмосферы и ионосферы может дать информацию о процессах, обуславливающих динамическую связь между различными атмосферными слоями.

Установлено, что в высоких и средних широтах интенсивность ионосферных волновых возмущений с периодами ВГВ имеет выраженную сезонную зависимость [Ratovsky et al., 2015; Frissell et al., 2016; Yasyukevich, 2021] с максимумом в зимние месяцы. Frissell et al. [2016] и Yasyukevich et al. [2020c] показали, что между сезонными вариациями интенсивности возмущений в ионосфере и параметрами нейтральной стратосферы в области ЦПВ наблюдается значимая корреляция. Возможная связь усиления зимней ионосферной возмущенности с динамикой стратомезосферного струйного течения над регионами Евразийского континента отмечена также в [Chernigovskaya et al., 2018].

Конфигурация ЦПВ и струйного течения сильно изменяется в течение зимы, характеризуясь значительной пространственной неоднородностью, при этом наиболее сильная трансформация ЦПВ происходит в периоды внезапных стратосферных потеплений (ВСП) [Labitzke, 1972; Schoeberl, 1978]. ВСП называют внезапное резкое повышение температуры стратосферы высоких широт в зимние месяцы, связанное с повышением волновой активности [Matsuno, 1971; Charlton, Polvani, 2007]. Нелинейное взаимодействие распространяющихся из тропосферы планетарных волн с нормальными стратосферным потоком в периоды ВСП приводит к ослаблению или разрушению ЦПВ в высокоширотной стратосфере. Струйное течение при этом изменяет свое положение, а его форма существенно модифицируется. Как следствие, генерация ВГВ-возмущений в стратосфере также происходит неравномерно.

В настоящем исследовании проводится совместный анализ пространственно-временной динамики интенсивности волновых возмущений с масштабами ВГВ в ионосфере и стратосфере в периоды развития и трансформации циркумполярного вихря с целью обнаружения связи между возмущениями в этих атмосферных слоях. Для анализа выбраны зимы 2012–2013 и 2018–2019 гг., в середине которых регистрировались сильные внезапные стратосферные потепления.

1. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Для анализа возмущенности стратосферы и нижней мезосферы в Северном полушарии в осенне-зимние периоды использовались данные ECMWF ERA-5 Global reanalysis. Архив предоставляет данные об основных параметрах атмосферного газа, полученные ассимиляцией измерений методами наземного и дистанционного зондирования в глобальной численной модели прогноза состояния стратосферы и тропосферы. Архив обеспечивает высокое пространственное разрешение данных (до 0.25° или ~ 30 км) по широте и долготе до уровня давле-

ния 1 гПа (соответствует высоте ~ 50 км, уровень верхней стратосферы — нижней мезосферы) [Hersbach et al., 2020]. В настоящей работе использовались данные с пространственным разрешением 0.75° по широте и долготе и временным разрешением 1 ч.

Для оценки уровня возмущенности в верхней стратосфере — нижней мезосфере в настоящей работе предложен модифицированный индекс возмущенности $stdW(\theta, \varphi, UT)$, рассчитываемый на основе глобальных полей вертикальной скорости атмосферного газа W . Значения индекса в данный момент универсального времени (UT) в каждой выбранной точке с заданной долготой θ и широтой φ определяются как среднеквадратичное отклонение вертикальной скорости газа $W(\theta, \varphi, UT)$ на данной широте от среднего значения в диапазоне долгот $\theta \pm 10^\circ$:

$$stdW(\theta, \varphi, UT) = \sqrt{(W(\theta, \varphi, UT) - \langle W(\theta \pm 10, \varphi, UT) \rangle)^2}. \quad (1)$$

Расчет СКО на таком интервале долгот приводит к исключению из рассмотрения крупномасштабных возмущений. Следует указать, что применение фиксированной границы по долготе будет приводить к различию в нижней границе отфильтрованных вариаций на разных широтах. Поскольку в работе рассматривается ограниченный интервал широт (40° – 60° N), на рассматриваемом интервале исключаются вариации с длиной волны более 1700–2500 км. Оценки типичных масштабов возмущений, наблюдаемых в распределениях вертикальной скорости в области ЦПВ, приведенные в работе [Шпынев и др., 2016], показали, что максимум в спектре наблюдаемых возмущений приходится на длины волн 300–1000 км (такой масштаб соответствует ВГВ). Таким образом, применение фильтра с указанными границами позволяет учесть при расчете индекса наиболее интенсивные вариации, а предлагаемый в работе индекс возмущенности отражает интенсивность волновых возмущений с масштабами, характерными для ВГВ. Индекс измеряется в тех же величинах, что и вертикальная скорость W [сПа/с].

Похожий индекс был использован в работе [Yasyukevich et al., 2020c] для оценки сезонных вариаций стратосферной возмущенности вдоль выбранной широты. Однако расчет СКО проводился вдоль всего зонального круга, что не позволяло оценить пространственные вариации такого индекса.

Для анализа короткопериодной возмущенности ионосферы использовались данные вертикального полного электронного содержания (ПЭС), полученные на основе измерений на всемирной сети приемников сигналов ГНСС, обработанные и предоставленные центром the OpenMadrigral database [Rideout, Coster, 2006]. Исходные данные имеют пространственное разрешение $1^\circ \times 1^\circ$ по широте и долготе и шаг по времени 5 мин.

Для расчетов все исходные данные ПЭС были рассортированы в ячейки размерностью $3^\circ \times 3^\circ$ по широте и долготе по всему земному шару. Значение ПЭС в каждой ячейке сетки получалось путем усреднения всех попавших в ячейку исходных вели-

чин ПЭС. Такой подход необходим для увеличения объема данных, поскольку из-за движения спутников конкретная ячейка исходной сетки не всегда заполнена значением ПЭС. В случае нулевой толерантности к пропускам объем заполненных ячеек не позволил бы проводить исследования на длительном интервале времени. Кроме того, в регионах с малым количеством станций данные Madrigal ПЭС могут характеризоваться ошибками и частым отсутствием данных в отдельных ячейках [Yasyukevich et al., 2020a]. Поэтому для ионосферных исследований в областях с малым числом приемных станций возможно использовать другие сервисы, например SIMuRG — System for Ionosphere Monitoring and Research from GNSS [Yasyukevich et al., 2020b]. В регионах с густой сетью станций качество данных Madrigal не уступает данным других сервисов [Rideout, Coster, 2006]. С учетом изложенного в настоящей работе выбраны две долготы в североамериканском (240° E) и европейском (10° E) секторах, на которых в Северном полушарии плотность станций (и, следовательно, данных ПЭС) высокая в оба рассматриваемых периода.

В каждой ячейке сетки проводился расчет индекса короткопериодной возмущенности $vrTEC(UT)$ [Ясюкевич и др., 2017]. Для момента времени UT значение индекса получается путем расчета среднеквадратичного отклонения ПЭС (TEC) на заданном интервале, центрированного на середину данного интервала и нормированного на среднее значение ПЭС в этом окне:

$$vrTEC(UT) = \frac{\sqrt{\langle (TEC(UT) - \langle TEC(UT \pm 2) \rangle) \rangle^2}}{\langle TEC(UT \pm 2) \rangle}, \quad (2)$$

где $\langle TEC(UT \pm 2) \rangle$ — усреднение ПЭС на заданном временном интервале. Для того чтобы индекс отражал уровень возмущенности с масштабами ВГВ, интервал усреднения должен быть ограничен несколькими часами (в настоящей работе — 4 ч). Индекс является безразмерной величиной, показывающей интенсивность флуктуаций ПЭС внутри заданного интервала относительно среднего ПЭС. Нормировка позволяет сравнивать ночную и дневную вариативность ПЭС. Следует отметить, что временное разрешение исходных данных ПЭС не позволяет оценить вклад наиболее мелкомасштабных акустических возмущений (с периодами менее 10 мин), поэтому используемый в работе индекс короткопериодной возмущенности учитывает вариации ПЭС с периодами от ~10 мин до ~4 ч. Такие периоды характерны для ВГВ. Данный индекс использовался ранее в работе [Yasyukevich et al., 2020c] для анализа сезонных вариаций ионосферной короткопериодной возмущенности. Примеры полученных распределений индекса $vrTEC(UT)$ в Северном полушарии на широтах 15–90° N для 19 декабря 2018 г. и 13 января 2019 г. в 0 UT приведены на рис. 1.

На основе полученных значений $vrTEC(UT)$ были построены широтно-временные распределения ионосферной возмущенности на выбранных долготах. В работе [Yasyukevich, 2021] показано, что короткопериодная возмущенность ПЭС испытывает значительные внутрисуточные вариации. На средне-

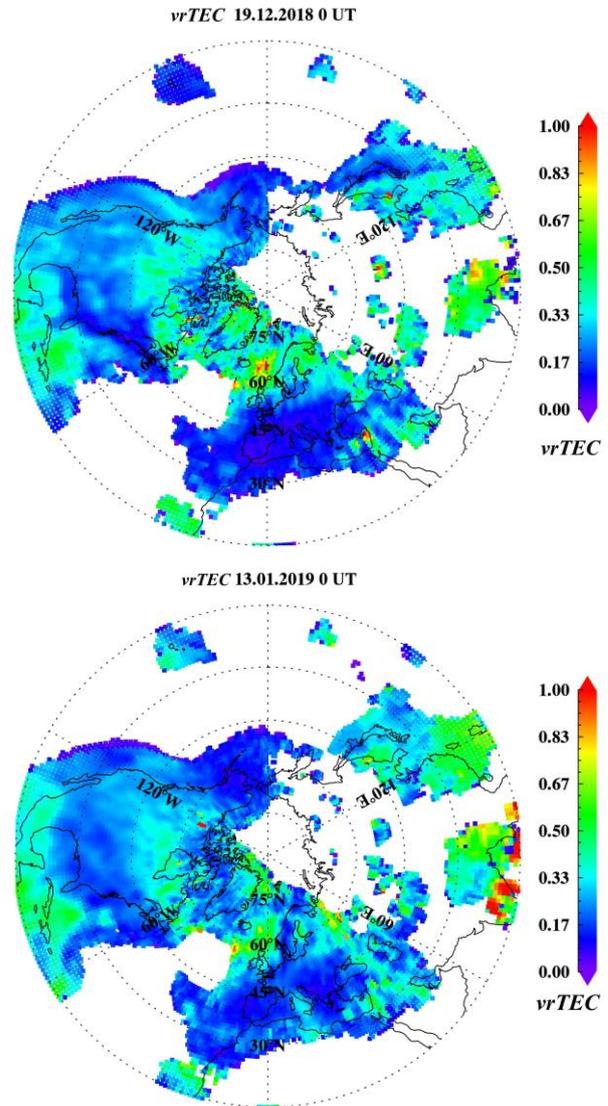


Рис. 1. Распределения индекса ионосферной возмущенности $vrTEC(UT)$ 19 декабря 2018 г. (вверху) и 13 января 2019 г. (внизу) в 0 UT (Северное полушарие, вид с полюса)

широтной станции в суточном ходе возмущенности выделяются два четко выраженных пика вблизи времен прохождения солнечных терминаторов, которые являются источником ионосферных возмущений различного масштаба [Afraimovich et al., 2009]. А на высокоширотной станции возмущенность значительно возрастает в ночное время, что может быть связано с авроральной активностью, усиливающейся в ночное время. С целью исключить влияние указанных возмущающих факторов при получении широтно-временных распределений ионосферной возмущенности на каждой широте проводилось усреднение всех значений $vrTEC(UT)$, соответствующих только околополуденному локальному времени (10–14 LT) на заданной долготе. Усреднение по времени необходимо для корректного сопоставления с динамикой индекса $stdW(\theta, \varphi, UT)$, временное разрешение которого существенно ниже. Для получения широтно-временных распределений индекса стратосферной возмущенности выбраны значения $stdW(\theta, \varphi, UT)$ в момент UT , наиболее близкий к локальному полудню на исследуемой долготе. Таким образом, в работе сравнивается дина-

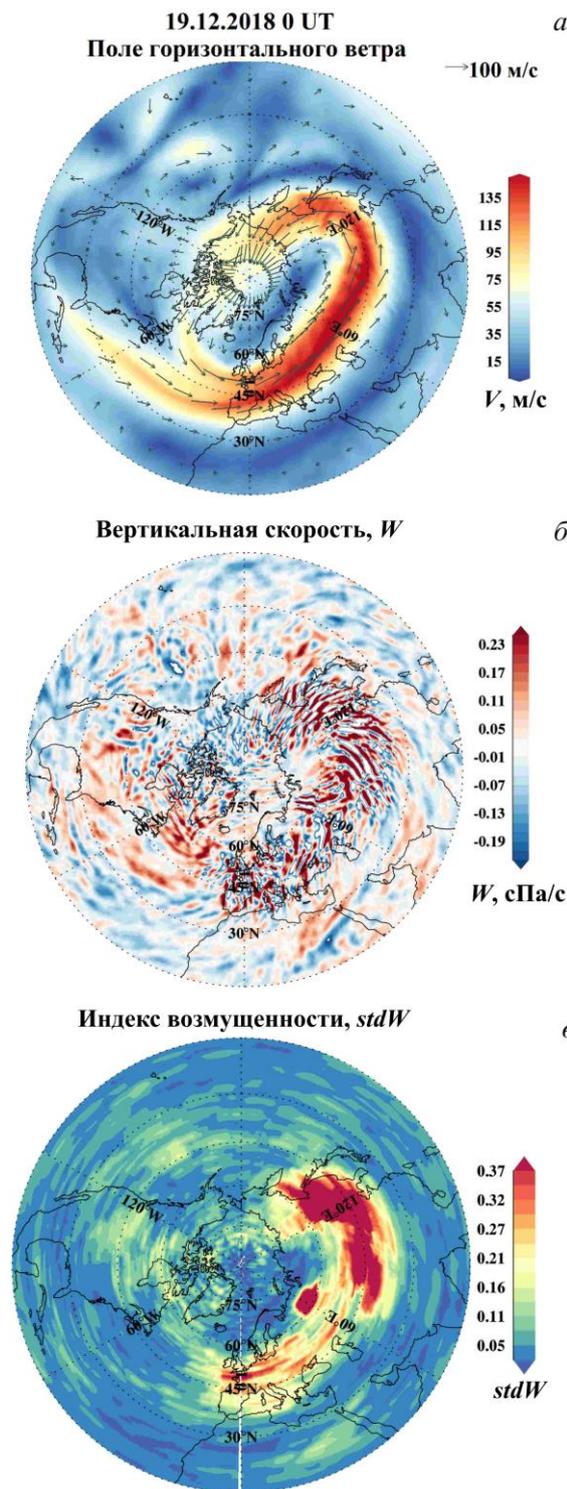


Рис. 2. Распределения полей горизонтального ветра (а), вертикальной скорости атмосферного газа W (б) и значений индекса возмущенности $stdW(\theta, \varphi, UT)$ (в) на уровне 1 гПа 19 декабря 2018 г. (Северное полушарие, вид с полюса)

мика распределений возмущенности ионосферы и стратосферы в локальное дневное время.

2. КОРОТКОПЕРИОДНАЯ ВОЗМУЩЕННОСТЬ В СТРАТОСФЕРЕ И ИОНОСФЕРЕ

На рис. 2 приведен пример распределений полей горизонтального ветра (а), вертикальной скорости

а

атмосферного газа W (б) и значений $stdW(\theta, \varphi, UT)$ (в) на уровне 1 гПа (около 50 км) 19 декабря 2018 г. (вид с полюса). Наблюдается хорошо развитое струйное течение, огибающее полюс. Струйное течение сопровождается выраженными среднemasштабными волновыми возмущениями, отчетливо наблюдаемыми в вариациях вертикальной скорости газа на широтах 40–60° N. Из распределений индекса возмущенности видно, что наибольшая интенсивность возмущений регистрируется в областях с высокими градиентами скорости горизонтального ветра в струйном течении: ~40–60° N и ~60–150° E.

На рис. 3 представлены аналогичные распределения для 13 января 2019 г. — периода после пика сильного ВСП.

Видно, что структура ЦПВ существенно изменена, струйное течение в околополярных широтах отсутствует. При этом наблюдается существенное ослабление генерации волновых возмущений, что отражается в низких значениях индекса стратосферной возмущенности. Таким образом, после сильных ВСП происходит «выключение» источника генерации мелкомасштабных возмущений в стратомезосфере, что может отражаться на возмущенности более высоких атмосферных слоев.

б

На рис. 4, 5 приведены широтно-временные распределения индексов возмущенности ПЭС в ионосфере (слева) и в верхней стратосфере на уровне 1 гПа (справа) на двух долготах в европейском (вверху) и американском (внизу) секторах в зимние периоды 2012–2013 и 2018–2019 гг. соответственно. Рассмотрен диапазон широт 40°–60° N, где интенсивность возмущений стратосферы в районе ЦПВ максимальна (см. рис. 2, в). Анализируемые зимние периоды характеризовались возникновением в стратосфере сильных ВСП. Центральные даты для указанных ВСП (день смены знака среднemasштабной циркуляции на уровне 10 гПа) регистрировались соответственно 6 января 2013 г. и 1 января 2019 г.

в

Из приведенных рисунков видно, что стратосферная возмущенность характеризуется существенной пространственно-временной неоднородностью. Уровень возмущенности в оба зимних периода значительно выше в европейском секторе, чем в американском (интенсивность цветовой шкалы отличается в два раза). В первый зимний месяц, когда в стратосфере существуют хорошо развитый ЦПВ и устойчивое струйное течение, наблюдаются высокие значения возмущенности, что свидетельствует о непрерывной генерации волновых возмущений в области струйного течения.

В периоды сильных ВСП циркумполярный вихрь и связанное с ним струйное течение сначала смещаются к полюсу, а затем разрушаются. В оба зимних периода после пиков ВСП отмечается существенное снижение возмущенности в стратосфере. Низкие значения уровня возмущенности наблюдаются около месяца. Затем происходит восстановление ЦПВ и усиление интенсивности возмущений.

В широтно-временных распределениях индекса возмущенности ионосферы можно выделить схожие вариации. Так, увеличение уровня возмущенности наблюдается в начале рассматриваемых зимних

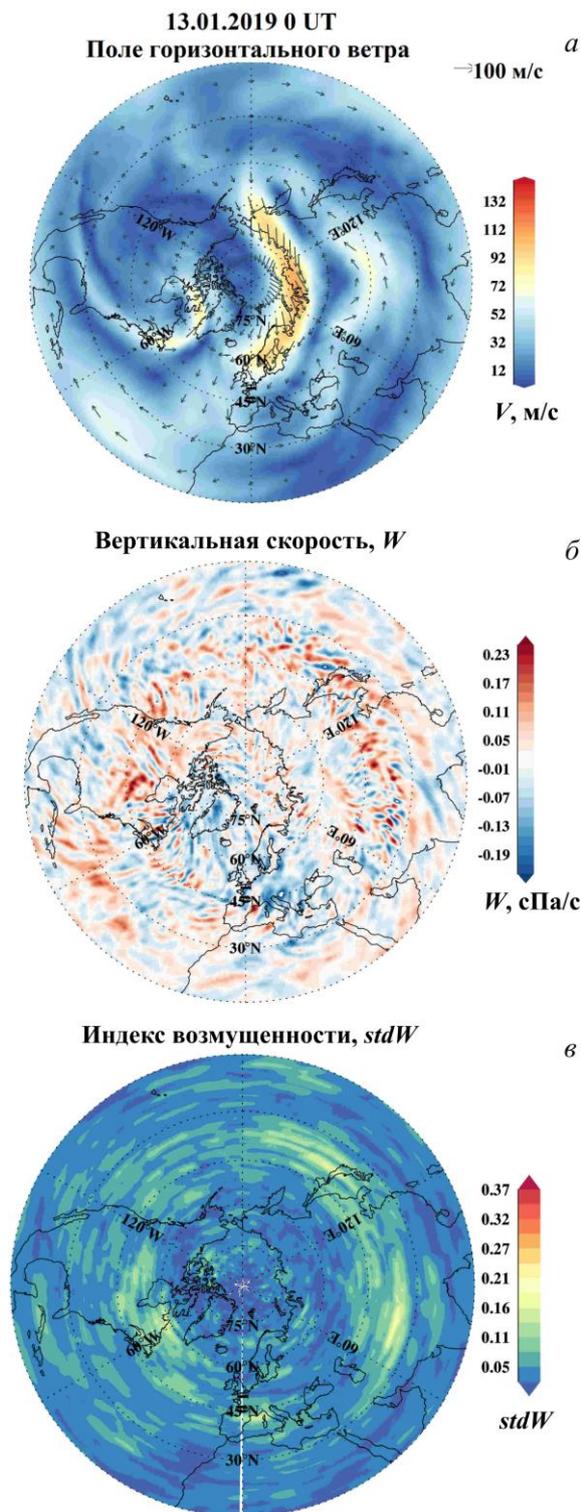


Рис. 3. Распределения полей горизонтального ветра (а), вертикальной скорости атмосферного газа W (б) и значений индекса возмущенности $stdW(\theta, \varphi, UT)$ (в) на уровне 1 гПа 13 января 2019 г. (Северное полушарие, вид с полюса)

периодов. После пиков ВСП (в середине января) уровень изменчивости в ионосфере существенно снижается.

Следует отметить, что изменение интенсивности возмущений в ионосфере происходит с некоторой задержкой относительно подобных вариаций в стратосфере (~7–10 дней). Например, резкое возрастание интенсивности возмущений на широтах 50° – 60° N в североамериканском секторе регистрируется в стра-

тосфере 5–10 января 2013 г. (рис. 4, з) и 10–15 января 2013 г. в ПЭС (рис. 4, в). Это совпадает с результатами, приведенными в работе [Yasyukevich et al., 2020c], где было показано, что максимум кросскорреляционной функции между вариациями в стратосфере и ионосфере наблюдается на среднеширотных станциях с задержкой от ~10 до 20 дней. В работе [Толстикова и др., 2021] проведено комплексное исследование проявлений волновой активности с периодами ВГВ в различных областях атмосферы: стратосфере, верхней мезосфере и F2-области ионосферы. Авторы показали, что наилучшая корреляция между стратосферной активностью и ВГВ-возмущенностью в ионосфере наблюдается при сдвиге стратосферной активности на ~15 дней. По мнению авторов, запаздывание между ВГВ-возмущенностью и стратосферной активностью порядка 15 дней объясняется соответствующим запаздыванием температурных вариаций на высотах нижней термосферы относительно температурных вариаций в стратосфере. Таким образом, наши результаты согласуются с данными опубликованных ранее работ.

Отметим также наличие в распределении ионосферной возмущенности периодических структур с большими периодами (ок. 5–6 сут), наиболее отчетливо выделяющихся в 2018–2019 гг. (рис. 5, а, в). Эти вариации могут быть связаны с воздействием планетарных волн, интенсивность которых также значительно усиливается в периоды развития ВСП [Pancheva et al., 2008]. Планетарные волны могут распространяться вверх, оказывая воздействие на параметры мезосферы — нижней термосферы [Zorkaltseva, Vasilyev, 2021], и посредством механизма волнового взаимодействия модулировать амплитуду ВГВ. Однако исследование таких крупномасштабных возмущений находится за рамками данной работы.

При сравнении возмущенности в стратосфере и ионосфере нужно учитывать тот факт, что ионосферная возмущенность, помимо воздействия нижележащих атмосферных слоев, определяется большим количеством факторов, таких как солнечная и геомагнитная активность, регулярные возмущения в области аврорального овала (на высоких широтах) и др. Поэтому нельзя ожидать, что широтно-временная картина возмущенности в ионосфере будет строго повторять такую картину в стратосфере.

Динамика индексов солнечной и геомагнитной активности по данным сервиса OMNIWeb [<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>] представлена на рис. 6. Следует отметить, что в целом гелиогеомагнитная обстановка в исследуемые периоды была достаточно спокойной. Наблюдались изолированные периоды слабых геомагнитных возмущений (индекс $K_p \leq 4.3$). Наиболее интенсивные геомагнитные возмущения ($K_p \leq 5.3$) регистрировались 4–5 января и 31 января – 2 февраля 2019 г. Все возмущенные периоды, для которых значения индекса K_p превышали 3.5, показаны на рис. 4 и 5 серой заливкой. Видно, что в вариациях индекса ионосферной возмущенности можно выделить усиления, связанные с изменениями геомагнитной обстановки. При этом геомагнитные вариации не могут объяснить большинство

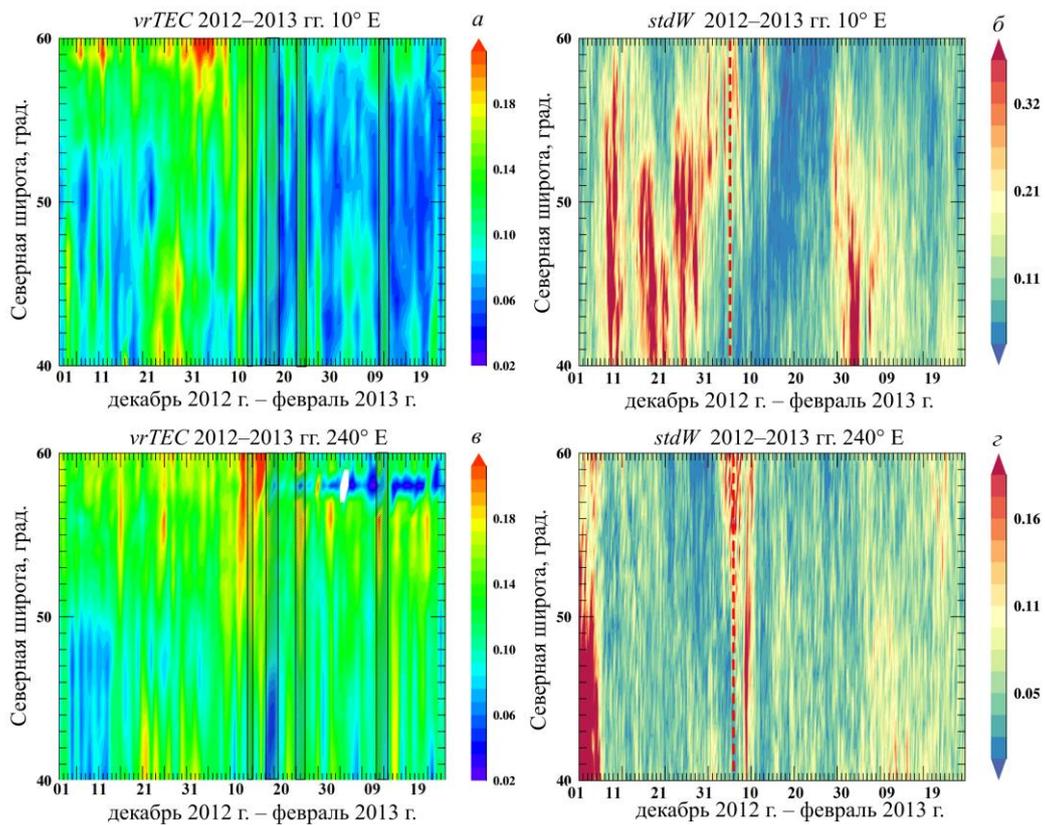


Рис. 4. Широтно-временные распределения индексов возмущенности в ионосфере (слева) и в верхней стратосфере (справа) на двух долготах в европейском (вверху) и американском (внизу) секторах зимой 2012–2013 гг. Периоды геомагнитный возмущений на панелях а и в показаны серой заливкой. Красными штрихами на панелях б, г отмечены центральные даты ВСП

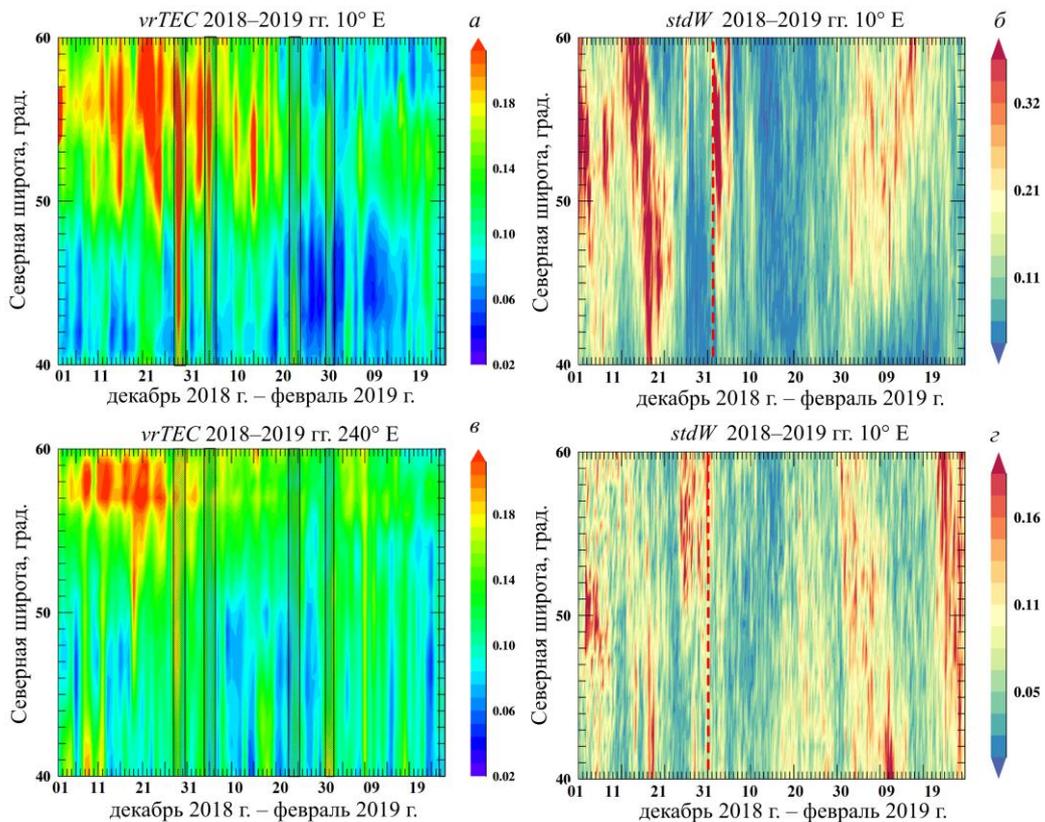


Рис. 5. Широтно-временные распределения индексов возмущенности в ионосфере (слева) и в верхней стратосфере (справа) на двух долготах в европейском (вверху) и американском (внизу) секторах зимой 2018–2019 гг. Периоды геомагнитный возмущений на панелях а и в показаны серой заливкой. Красными штрихами на панелях б, г отмечены центральные даты ВСП

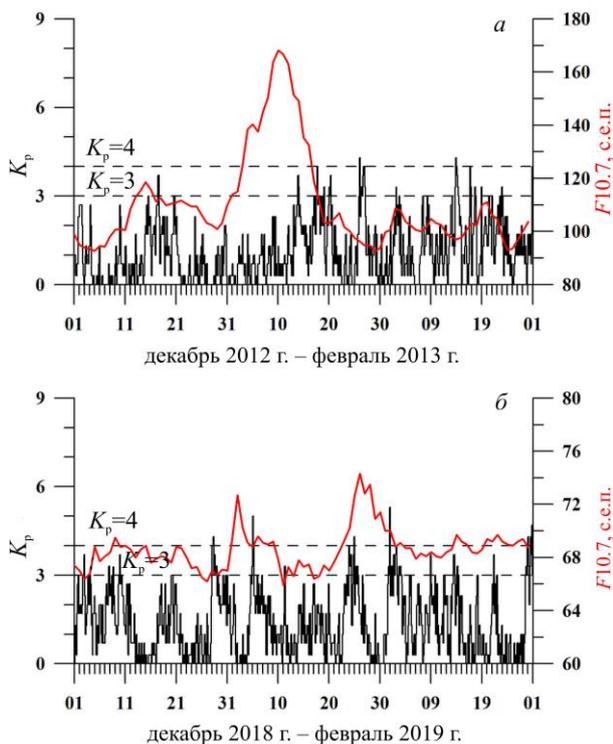


Рис. 6. Динамика индексов геомагнитной активности (K_p , черные кривые) и потока солнечного радиоизлучения ($F_{10.7}$, красные кривые) в рассматриваемые периоды

наблюдаемых в рассматриваемые периоды изменений индекса ионосферной возмущенности. Наиболее существенные вариации солнечной активности наблюдались в январе 2013 г.: значения индекса $F_{10.7}$ резко возрастали от ~ 100 до ~ 170 с.е.п. (рис. 6, а), однако схожих вариаций в динамике индекса ионосферной возмущенности не отмечается.

Таким образом, наблюдаемое синхронное снижение уровня возмущенности в стратосфере и ионосфере после пиков сильных ВСП указывает на связь между возмущенностью в этих атмосферных слоях и является доказательством воздействия волновых возмущений, возникающих в околополярной стратосфере в области ЦПВ, на ионосферную плазму. Уменьшение активности ВГВ в ионосфере после пика сильного ВСП зимой 2008–2009 гг. зарегистрировано в работе [Nayak, Yiğit, 2019]. Авторы предположили, что снижение активности ВГВ связано с изменениями условий распространения волн. Однако результаты, представленные в настоящей работе, показывают, что основной причиной является разрушение ЦПВ и, как следствие, прекращение генерации волновых возмущений в стратосфере.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен совместный анализ пространственно-временной динамики возмущенности (с масштабами ВГВ) в ионосфере и стратосфере в зимние периоды 2012–2013 и 2018–2019 гг. на средних широтах и двух долготах в европейском и североамериканском секторах. Указанные периоды характеризовались возникновением сильных внезапных стратосферных потеплений, когда в стратосфере происходит

значительная трансформация циркумполярного вихря и связанного с ним струйного течения.

Показано, что стратосферная возмущенность характеризуется существенной пространственно-временной неоднородностью. Максимальные значения индекса стратосферной возмущенности регистрируются в областях, характеризующихся высокими градиентами скорости горизонтального ветра в струйном течении. В оба рассматриваемых зимних периода после пиков ВСП отмечается существенное снижение возмущенности в стратосфере, наблюдаемое около месяца.

В широтно-временных распределениях индекса возмущенности ПЭС ионосферы на средних широтах выделены схожие вариации: увеличение уровня возмущенности в начале рассматриваемых зим и существенное снижение изменчивости в середине января после пиков ВСП.

Прекращение генерации волновых возмущений в стратосфере, связанное с разрушением циркумполярного вихря и струйного течения в периоды ВСП, может объяснять уменьшение возмущенности ионосферы в середине рассматриваемых зимних периодов.

Авторы благодарны MIT Haystack Observatory за данные Madrigal TEC, ECMWF за данные архива ERA5 Reanalysis, а также сервису OMNIWeb за данные по индексам геомагнитной активности. Работа выполнена при поддержке РФФ, грант № 20-77-00070.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Толстикова М.В., Ратовский К.Г., Медведева И.В., Хабитуев Д.С. Оценка влияния стратосферной активности на ионосферу по данным измерений на комплексе инструментов ИСЗФ СО РАН. *Солнечно-земная физика*. 2021. Т. 7, № 4. С. 84–90. DOI: [10.12737/szf-74202108](https://doi.org/10.12737/szf-74202108).
- Шпынев Б.Г., Черниговская М.А., Хабитуев Д.С. Спектральные характеристики атмосферных волн, генерируемых зимним стратосферным струйным течением северного полушария. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2016. Т. 13, № 2. С. 120–131. DOI: [10.21046/2070-7401-2016-13-2-120-131](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2016-13-2-120-131).
- Ясюкевич А.С., Черниговская М.А., Мылникова 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, № 3. С. 249–262. DOI: [10.21046/2070-7401-2017-14-4-249-262](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-4-249-262).
- Afraimovich E.L., Edemskiy I.K., Voeykov S.V., et al. The first GPS-TEC imaging of the space structure of MS wave packets excited by the solar terminator. *Ann. Geophys.* 2009. Vol. 27. P. 1521–1525. DOI: [10.5194/angeo-27-1521-2009](https://doi.org/10.5194/angeo-27-1521-2009).
- Charlton A.J., Polvani L.M. A new look at stratospheric sudden warmings. Part I: climatology and modeling benchmarks. *J. Climate*. 2007. Vol. 20. P. 449–469. DOI: [10.1175/JCLI3996.1](https://doi.org/10.1175/JCLI3996.1).
- 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).
- Forbes J.M., Palo S.E., Zhang X. Variability of the ionosphere. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2000. Vol. 62. P. 685–693. DOI: [10.1016/S1364-6826\(00\)00029-8](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(00)00029-8).
- Frissell N.A., Baker J.B.H., Ruohoniemi J.M., et al. Sources and characteristics of medium-scale traveling iono-

spheric disturbances observed by high-frequency radars in the North American sector. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2016. Vol. 121. P. 3722–3739. DOI: [10.1002/2015JA022168](https://doi.org/10.1002/2015JA022168).

Gerrard A.J., Bhattacharya Y., Thayer J.P. Observations of in-situ generated gravity waves during a stratospheric temperature enhancement (STE) event. *Atmos. Chemistry Phys.* 2011. Vol. 11. P. 11913–11917. DOI: [10.5194/acp-11-11913-2011](https://doi.org/10.5194/acp-11-11913-2011).

Hersbach H., Bell B., Berrisford P., et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society.* 2020. Vol. 146. P. 1999–2049. DOI: [10.1002/qj.3803](https://doi.org/10.1002/qj.3803).

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).

Kaifler B., Lübken F.-J., Höffner J., et al. Lidar observations of gravity wave activity in the middle atmosphere over Davis (69° S, 78° E), Antarctica. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2015. Vol. 120. P. 4506–4521. DOI: [10.1002/2014JD022879](https://doi.org/10.1002/2014JD022879).

Labitzke K. Temperature changes in the mesosphere and stratosphere connected with circulation changes in winter. *J. Atmos. Sci.* 1972. Vol. 29. P. 756–766. DOI: [10.1175/1520-0469\(1972\)029<0756:TCITMA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1972)029<0756:TCITMA>2.0.CO;2).

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 X., Yue J., Xu J., et al. Variations of global gravity waves derived from 14 years of SABER temperature observations. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2017. Vol. 122. P. 6231–6249. DOI: [10.1002/2017JD026604](https://doi.org/10.1002/2017JD026604).

Matsuno T. A dynamical model of the stratospheric sudden warming. *J. Atmos. Sci.* 1971. Vol. 28. P. 1479–1494. DOI: [10.1175/1520-0469\(1971\)028<1479:ADMOTS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1971)028<1479:ADMOTS>2.0.CO;2).

Nayak C., Yiğit E. Variation of small-scale gravity wave activity in the ionosphere during the major sudden stratospheric warming event of 2009. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2019. Vol. 124. P. 470–488. DOI: [10.1029/2018JA026048](https://doi.org/10.1029/2018JA026048).

Pancheva D., Mukhtarov P., Mitchell N.J., et al. Planetary waves in coupling the stratosphere and mesosphere during the major stratospheric warming in 2003/2004. *J. Geophys. Res.* 2008. Vol. 113. D12105. DOI: [10.1029/2007JD009011](https://doi.org/10.1029/2007JD009011).

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).

Rideout W., Coster A. Automated GPS processing for global total electron content data. *GPS Solutions.* 2006. Vol. 10. P. 219–228. DOI: [10.1007/s10291-006-0029-5](https://doi.org/10.1007/s10291-006-0029-5).

Schoeberl M.R. Stratospheric warmings: observations and theory. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 1978. Vol. 16. P. 521–538. DOI: [10.1029/RG016i004p00521](https://doi.org/10.1029/RG016i004p00521).

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).

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.S. Features of short-period variability of total electron content at high and middle latitudes. *Solar-Terr. Phys.* 2021. Vol. 7, iss. 4. P. 71–78. DOI: [10.12737/stp-74202107](https://doi.org/10.12737/stp-74202107).

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.* 2020a. Vol. 20, iss. 19, 5702. DOI: [10.3390/s20195702](https://doi.org/10.3390/s20195702).

Yasyukevich Y.V., Kiselev A.V., Zhivetiev I.V., et al. SIMuRG: System for ionosphere monitoring and research from GNSS. *GPS Solut.* 2020b. Vol. 24, 69. DOI: [10.1007/s10291-020-00983-2](https://doi.org/10.1007/s10291-020-00983-2).

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.* 2020c. Vol. 12, 1588. DOI: [10.3390/rs12101588](https://doi.org/10.3390/rs12101588).

Yiğit E., Medvedev A.S. Role of gravity waves in vertical coupling during sudden stratospheric warmings. *Geoscience Lett.* 2016. Vol. 3, 27. DOI: [10.1186/s40562-016-0056-1](https://doi.org/10.1186/s40562-016-0056-1).

Zorkal'tseva O.S., Vasilyev R.V. Stratospheric influence on the mesosphere–lower thermosphere over mid latitudes in winter observed by a Fabry–Perot interferometer. *Ann. Geophys.* 2021. Vol. 39. P. 267–276. DOI: [10.5194/angeo-39-267-2021](https://doi.org/10.5194/angeo-39-267-2021).

URL: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html> (дата обращения 30 марта 2022 г.).

Как цитировать эту статью:

Ясюкевич А.С., Веснин А.М. Сравнительный анализ возмущенности в среднеширотной стратосфере и ионосфере в зимние периоды. *Солнечно-земная физика.* 2022. Т. 8, № 2. С. 67–74. DOI: [10.12737/szf-82202209](https://doi.org/10.12737/szf-82202209).